

MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE LA FORET
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER

THESE

présentée à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier
pour obtenir le Diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques

**Etude de propriétés physiques, hydriques et mécaniques
de sols andiques de la Réunion.**

**Facteurs naturels et anthropiques d'évolution des horizons culturaux,
implications agronomiques et écologiques.**

par

Sylvain PERRET

Soutenue le 4 décembre 1992 devant le Jury composé de :

BOTTNER Pierre, Directeur de Recherches CNRS-CEPE Montpellier ;
DUCREUX Alain, Ingénieur de Recherche CIRAD-SAR Réunion, **Rapporteur** ;
FIES Jean-Claude, Directeur de Recherches INRA Avignon, **Rapporteur** ;
MANIERE Georges, Professeur ENSA Montpellier, Directeur de Thèse ;
MOINEREAU Jacques, Professeur ENSA Montpellier.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE LA FORET
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER

THESE

présentée à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier
pour obtenir le Diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques

**Etude de propriétés physiques, hydriques et mécaniques
de sols andiques de la Réunion.**

**Facteurs naturels et anthropiques d'évolution des horizons culturaux,
implications agronomiques et écologiques.**

par

Sylvain PERRET

Soutenue le 4 décembre 1992 devant le Jury composé de :

BOTTNER Pierre, Directeur de Recherches CNRS-CEPE Montpellier ;
DUCREUX Alain, Ingénieur de Recherche CIRAD-SAR Réunion, **Rapporteur** ;
FIES Jean-Claude, Directeur de Recherches INRA Avignon, **Rapporteur** ;
MANIERE Georges, Professeur ENSA Montpellier, Directeur de Thèse ;
MOINEREAU Jacques, Professeur ENSA Montpellier.

- ... on peut regarder une pièce d'un puzzle pendant trois jours et croire tout savoir de sa configuration et de sa couleur sans avoir le moins du monde avancé : seule compte la possibilité de relier cette pièce à d'autres pièces, et en ce sens il y a quelque chose de commun entre l'art du puzzle et l'art du go ; seules les pièces rassemblées prendront un caractère lisible, prendront un sens : considérée isolément, une pièce d'un puzzle ne veut rien dire ; elle est seulement question impossible, défi opaque ... -

G. Perec. "La vie : mode d'emploi"

Avant-propos

Ce travail a été principalement accompli à La Réunion, au sein du dispositif CIRAD, tant sur les stations expérimentales qu'en laboratoire.

De nombreuses personnes en ont permis ou facilité la réalisation, et je voudrais ici leur exprimer ma gratitude.

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à Monsieur Le Professeur Georges MANIERE, Directeur de thèse et Responsable de la Chaire de Machinisme et Génie Rural à l'ENSA de Montpellier. Il m'a accordé sa confiance, a participé à la conception de ce travail, et a su m'insuffler son souci de mieux comprendre les relations entre les propriétés des sols et les opérations culturales, tout en me laissant une grande latitude. Pour tout cela et pour son soutien tant scientifique que moral, je lui adresse mes sincères remerciements.

Je tiens à remercier les membres du jury, qui ont accepté de juger ce travail : Messieurs Pierre BOTTNER, Directeur de Recherches au CNRS-CEPE Montpellier, Alain DUCREUX, Ingénieur de Recherche au CIRAD-SAR Réunion, Jean Claude FIES, Directeur de Recherches à l'INRA Avignon, Jacques MOINEREAU, Professeur à l'ENSA Montpellier.

Ma reconnaissance s'adresse également aux scientifiques dont l'assistance s'est avérée très précieuse au cours de la réalisation de ce travail :

Michel ROBERT et Daniel TESSIER, Directeurs de recherche à l'INRA Versailles, pour leurs suggestions pertinentes en matière de physique des sols, pour l'accueil qui m'a été réservé lors de mes visites dans leur laboratoire, pour les analyses minéralogiques effectuées ;

Michel VAUCLIN, Directeur de recherche à l'IM Grenoble-CNRS, qui a chacun de ses passages à la Réunion, a su proposer des méthodes nouvelles (infiltrométrie à succion contrôlée, approche géostatistique) aptes à enrichir le contenu de ce travail ;

Marinus BROUWERS et Michel FORTIER, du CIRAD-CA, Chercheurs au Laboratoire de Gestion Physique des Sols ENSA-CIRAD de Montpellier, pour leur appui méthodologique, analytique et leur connaissance des comportements physiques et mécaniques des andosols ;

Jacques BOUGERE, Enseignant-Chercheur à l'Université de la Réunion, qui m'a permis d'utiliser le simulateur de pluie, et son banc à minéraliser, sa connaissance des processus d'érosion et le temps qu'il m'a accordé ont été appréciés ;

Michel RAUNET, Responsable de Programme au CIRAD-CA Montpellier, pour son soutien amical, son intérêt pour ce travail, ses conseils.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers les responsables du Département, M. Bernard CHEZE, Directeur du CEEMAT, puis M. Jacques LEFORT, Directeur du CIRAD-SAR, ainsi qu'à MM. Marc LEMOIGNE et Jean PICHOT ; ils ont perçu l'intérêt de ce travail, m'ont fait confiance et ont su dégager les moyens et le temps pour qu'il se réalise.

Je veux remercier ici Jean SERVANT, responsable du CIRAD à La Réunion ; son accueil sur la station de La Bretagne, son intérêt marqué pour le contenu de ce travail, son soutien chaleureux continu, ont été pour moi déterminants. Il m'est très agréable de lui exprimer ici mes sincères remerciements et mon amitié.

Au CIRAD Réunion, j'ai eu la chance de travailler avec des collègues, chercheurs motivés et compétents, sans lesquels ce travail n'aurait pu se faire :

Que mon ami Roger MICHELLON trouve ici mes remerciements, bien pâles par rapport à l'aide qu'il a toujours accepté de m'apporter dans mes expérimentations au champ, avec chaleur, efficacité et motivation. Sa connaissance des systèmes de culture des Hauts m'a été précieuse.

Mes collègues du CIRAD SAR : Roland PIROT, Jean Marie PAILLAT, Bernard SIEGMUND, Jean Paul DANFLOUS, ont toujours su pallier à mon manque d'expérience en machinisme, dans une ambiance sympathique de véritable équipe. Leurs points de vue et leur expérience m'ont beaucoup appris. L'équipe de l'atelier, dirigée par Roger BARNETCH, a réglé pour moi des problèmes techniques. Alain CLARIOND et Dominique GUILLUY m'ont fourni une assistance efficace pour les manipulations de terrain.

Je les remercie tous vivement de m'avoir supporté et d'avoir su dégager du temps et des moyens pour que ce travail se réalise.

Les stagiaires qui ont travaillé avec moi sur le programme, Frédérique GAUDY et Marc WEYLAND, m'ont apporté beaucoup, par leur efficacité, par leur oeil neuf, critique et souvent pertinent. Je suis heureux de pouvoir les en remercier ici.

Tant au plan scientifique qu'humain, j'ai pu profiter de coups de pouce amicaux, quotidiens et appréciables de collègues, intéressés et soucieux de voir ce travail mené à bien :

Ainsi Frédéric DEMARNE m'a fait profiter de son aide précieuse en micro-informatique et techniques audio-visuelles et a accepté de lire et corriger avec pertinence et rigueur une grande partie du document. J'ai trouvé en Grégoire VINCENT, Jean-Marc CHASTEL et Pierre-François CHABALIER, des interlocuteurs attentifs et bienveillants, précieux au quotidien. Patrick LEGIER et son équipe ont été d'une grande efficacité pour traiter mes nombreux échantillons.

A tous, j'ai plaisir à exprimer mon amitié et mes remerciements pour ces contributions.

Messieurs CLAIN et PAYET, agriculteurs à La Réunion, nous ont permis de travailler sur leurs parcelles, réservant un accueil toujours patient, amical et intéressé à nos expérimentations. Je leur exprime ici une profonde reconnaissance.

Enfin, excusez moi, Isa, Léa, Zoé, pour mes absences. Merci pour votre détachement.

Sommaire

AVANT PROPOS	p 7
SOMMAIRE	p 9
INTRODUCTION GENERALE	p 17
PREMIERE PARTIE : LES MILIEUX NATURELS ET AGRICOLES. LES SOLS.	p 21
I- Présentation générale	p 23
1. Situation et présentation géomorphologique	p 23
2. Aperçu volcanologique - géologie	p 23
2.1. Le massif du Piton des Neiges	p 23
2.2. Le massif du Piton de la Fournaise	p 24
3. Le climat	p 24
4. La végétation naturelle	p 33
5. Cultures et productions agricoles	p 33
5.1. La canne à sucre	p 33
5.2. Les systèmes de culture à base de géranium	p 34
5.3. Autres productions	p 37
II- Les sols	p 38
1. Présentation générale	p 38
2. Principaux sols et caractéristiques	p 39
3. Les andosols	p 39
3.1. Position dans les classifications	p 39
3.2. Substrat géologique et génèse	p 40
3.2.1. Les cendres volcaniques : substrat d'altération rapide	p 40
3.2.2. L'andolisation : processus dynamique et instable	p 40
3.3. Traits morphologiques et analytiques	p 41
3.3.1. Des profils différenciés, polygéniques	p 41
3.3.2. Profil-type et description des horizons culturaux	p 41
3.3.3. Caractéristiques chimiques	p 43
3.4. Minéralogie et propriétés associées	p 43
3.4.1. Constitution des andosols : généralités	p 43
3.4.2. Minéralogie des séquences de La Réunion	p 44
3.4.3. Surface spécifique et masse volumique du solide	p 46
3.4.4. Micro-organisation et granulométrie minérale	p 47

4. Sols et sites d'étude	p 47
4.1. Critères de choix	p 47
4.2. Séquences de sols et stations de recherche	p 48
4.2.1. L'ouest	p 48
4.2.2. Le sud	p 48

DEUXIEME PARTIE : ETUDE ANALYTIQUE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES :

ETAT HYDRIQUE ET EVOLUTION DES MATERIAUX p 53

I- Introduction p 53

II- Le sol : système dispersé à trois phases p 54

1. Généralités p 54

2. Relations entre volumes et masses des phases du sol p 54

2.1. Notations p 54

2.2. Relations de base : approches pondérale et volumique p 55

2.3. Intérêt d'un système de référence volumique p 56

2.4. Méthodes de mesure de la répartition des phases du sol p 56

2.4.1. Méthodes gravimétriques p 56

2.4.2. Méthodes radiatives p 56

3. Réflexions préalables à l'étude expérimentale p 57

III- Etat hydrique et granulométrie des particules élémentaires p 58

1. Position du problème p 58

2. L'analyse granulométrique sur andosol p 58

2.1. La floculation p 58

2.2. La dissociation des particules agrégées p 59

2.2.1. Agrégation lors du séchage manipulateur préalable p 59

2.2.2. Agrégation dans un horizon : le problème de caractérisation de la texture p 60

2.3. Protocoles adoptés p 60

2.3.1. Préparation et prise d'essai p 60

2.3.2. Destruction de la matière organique p 60

2.3.3. Désaturation et dispersion p 61

2.3.4. Tamisage : extraction des sables et limons grossiers p 61

2.3.5. Mise en suspension et sédimentométrie p 62

2.4. Granulométrie des éléments minéraux : résultats et mises au point expérimentales p 62

2.4.1. Types de sol et effets du séchage p 62

2.4.2. Efficacité de l'eau oxygénée	p 63
2.4.3. Effets de la destruction de la M.O. et du séchage	p 63
3. Etat hydrique et évolution des particules élémentaires stables	p 64
3.1. Brunisol andique à halloysite	p 64
3.1.1. Distributions granulométriques	p 64
3.1.2. Trajets granulométriques	p 66
3.2. Andosol à allophanes et gibbsite	p 66
3.2.1. Distributions granulométriques	p 66
3.2.2. Trajets granulométriques	p 66
3.2.3. Evolution simultanée de la texture et de l'état hydrique : recrutements et seuils	p 68
3.3. Discussion	p 69
3.3.1. Distribution des particules et propriétés physiques macroscopiques	p 69
3.3.2. Distribution des particules stables et structure	p 70
IV- Etat hydrique et caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux	p 72
1. Rétention de l'eau et porosités	p 72
1.1. L'eau du sol : aspects énergétiques	p 72
1.1.1. La notion de potentiel	p 72
1.1.2. Le potentiel matriciel	p 72
1.2. Approches expérimentales des relations état énergétique - teneur en eau	p 74
1.2.1. Mesures au champ	p 75
1.2.2. Mesures en laboratoire	p 77
1.2.3. Comparaison des méthodologies employées et variabilité des mesures	p 79
1.3. Affinité pour l'eau : relations teneur en eau / potentiel de l'eau	p 81
1.3.1. Séquences altitudinales et types d'horizons	p 82
1.3.2. Seuil de dessiccation et modification irréversible du comportement des horizons d'altération	p 84
1.4. Evolutions simultanées de la teneur en eau et de la porosité	p 87
1.4.1. Evolution de l'indice d'eau et de l'indice des vides	p 87
1.4.2. Courbes de retrait établies sur mottes	p 92
1.4.3. Les systèmes de porosité	p 92
1.5. Relations entre les différents types d'eau et les fractions minérales et organiques	p 95
1.5.1. Méthodes et résultats	p 95
1.5.2. Discussion	p 96

2. Comportement mécanique des matériaux remaniés.	
porosités et contraintes mécaniques	p 98
2.1. Consistances et teneurs en eau caractéristiques	p 98
2.1.1. Généralités	p 98
2.1.2. Limites d'Atterberg : liquidité et plasticité	p 99
2.1.3. Retrait du sol remanié : limite et courbe	p 101
2.2. Test de compactage : évolution du système poral sous contrainte mécanique	p 104
2.2.1. Généralités	p 104
2.2.2. Procédure expérimentale et résultats	p 106
2.3. Conclusion	p 109
V- Conclusion à la deuxième partie	p 111

TROISIEME PARTIE :

ETUDE EXPERIMENTALE *IN SITU* DES HORIZONS CULTURAUX :

ETATS STRUCTURAUX ET PROCESSUS GENERATEURS D'EROSION,

INTERACTION MILIEU - OPERATIONS CULTURALES - PLANTES

p 115

I- Introduction

p 117

II- Comportement structural et hydrodynamique des horizons superficiels, Implications dans les processus d'érosion

p 118

1. Introduction

p 118

1.1. L'érosion pluviale dans les systèmes de culture sur andosols

p 118

1.2. Méthodes de travail et objectifs

p 121

2. Agrégation et états structuraux des sols andiques

p 122

2.1. Généralités, observations des états structuraux *in situ*

p 122

2.2. La quantification de la structure, un problème métrologique

p 127

2.3. Déterminants de l'état structural et résultats obtenus

p 128

2.3.1. Types de substrats, matière organique et état hydrique

p 128

2.3.2. Résultats

p 129

2.3.3. Incidences des itinéraires de préparation de sol : observations ponctuelles

p 132

2.3.4. Variabilité spatiale et interactions à l'échelle parcellaire

p 133

3. Etat structural et fonctionnement hydrodynamique des horizons cultureux

p 147

3.1. Sites d'étude

p 147

3.2. La simulation de pluie

p 147

3.2.1. Intérêts

p 147

3.2.2. Matériel

p 148

3.2.3. L'hydrogramme du ruissellement	p 150
3.2.4. Observations complémentaires	p 152
3.3. Mesures connexes	p 152
3.3.1. Humidimétrie	p 152
3.3.2. Granulométrie d'agrégats	p 153
3.3.3. Aspérimétrie (rugosimétrie)	p 153
3.3.4. Conductivité hydraulique	p 154
3.3.5. Mesures concernant la charge solide	p 154
3.4. Conditions initiales	p 154
3.4.1. Conditions initiales par parcelle	p 154
3.4.2. Conditions initiales par traitement	p 155
3.5. Hydrodynamique superficielle : les hydrogrammes	p 156
3.5.1. Observations préalables	p 156
3.5.2. Paramètres hydrodynamiques : déterminismes et variabilités	p 159
3.6. Les transports solides	p 161
3.6.1. Effets des conditions initiales	p 161
3.6.2. Relations ruissellement / turbidité	p 164
3.7. Evolution de l'état structural de surface et mécanismes du ruissellement	p 165
3.7.1. Indices et variations calculés	p 165
3.7.2. Evolutions granulométriques en surface et dans la charge solide	p 165
3.7.3. Evolutions globales de la structure superficielle et du micro-relief	p 168
4. Synthèse et conclusions	p 171
4.1. L'état structural des horizons superficiels : déterminismes	p 171
4.2. Etat structural et hydrodynamique superficielle	p 172
III- Interactions entre le milieu et les opérations culturales	p 174
1. L'anthropisation des horizons culturaux :	
opérations de préparation mécanisées et fonctionnements des sols	p 174
1.1. Le travail du sol dans les systèmes de culture sur andosols, généralités	p 174
1.1.1. Evolution des systèmes de culture et couverture pédologique	p 174
1.1.2. Le travail du sol dans les différents systèmes	p 174
1.1.3. Modalités techniques et motivations du recours au travail du sol	p 175
1.1.4. Description et comportement général des outils utilisés	p 177
1.2. Façons culturales et évolutions du sol : cas d'un andosol perhydraté	p 181
1.2.1. Profil cultural	p 181
1.2.2. Etat de surface et foisonnement	p 184
1.2.3. Répartition des phases du sol : porosités	p 187

1.3. Travail du sol et répartition des phases : évolutions spatiales et temporelles	p 189
1.3.1. Répartition des phases du sol : évolution temporelle dans des profils	p 189
1.3.2. Evolutions et structures spatiales des paramètres de répartition des phases	p 196
1.4. Travail du sol et hydrodynamique :	
conductivités hydrauliques des horizons culturaux	p 201
1.4.1. Rappels	p 201
1.4.2. Conductivités hydrauliques des horizons et travail du sol	p 203
1.5. Conclusions : travail du sol et fonctionnement de l'horizon cultural	p 205
1.5.1. Travail du sol, profils culturaux et fonctionnements du sol	p 205
1.5.2. Travail du sol et variables d'état : évolution spatiale et temporelle	p 205
1.5.3. Synthèse : le problème du travail du sol dans les agrosystèmes vivriers sur andosols	p 206
2. Aspects agronomiques, étude des relations plante - milieu andique selon différents itinéraires	p 208
2.1. Travail du sol et comportement racinaire	p 208
2.1.1. Généralités	p 208
2.1.2. Cas particuliers	p 208
2.2. Etablissement des rendements et paramètres édaphiques :	
présentation de la méthode	p 209
2.2.1. Généralités	p 209
2.2.2. Les données du milieu physique	p 210
2.2.3. Les données agronomiques, l'itinéraire	p 211
2.2.4. Distribution et structure de variabilité spatiale des variables	p 212
2.3. Etablissement des rendements en maïs :	
paramètres édaphiques, type d'horizon et itinéraires de préparation de sol	p 212
2.3.1. Statistique des données obtenues par placette	p 212
2.3.2. Approche qualitative	p 217
2.3.3. Approche quantitative : mise en relation des variables	p 218
2.3.4. Approche cartographique	p 223
2.3.5. Rendements en maïs : observations complémentaires	p 224
2.4. Etablissement des rendements en haricot : paramètres édaphiques, type d'horizon et itinéraires de préparation de sol	p 230
2.4.1. Statistique des données obtenues par placette	p 230
2.4.2. Approche descriptive qualitative	p 230
2.4.3. Approche quantitative : mise en relation des variables	p 232
2.4.4. Rendements en haricot : observations complémentaires	p 233

2.5. Synthèse et conclusions	p 233
2.5.1. La méthode : traitement d'informations spatialisées et interpolation	p 233
2.5.2. Résultats expérimentaux	p 234
3. Caractéristiques édaphiques et fonctionnement des matériels de préparation des andosols cultivés	p 236
3.1. Introduction, définition de la méthode	p 236
3.1.1. Avant-propos : le développement récent d'une approche intégrée	p 236
3.1.2. Méthodologie	p 237
3.2. Obtention des données	p 237
3.2.1. Les données du milieu physique	p 238
3.2.2. Les données recueillies par la chaîne de mesure embarquée	p 241
3.3. Résultats - Discussion	p 241
3.3.1. Observations générales concernant le travail réalisé	p 241
3.3.2. Tableau de données et paramètres statistiques	p 241
3.3.3. Etude de l'échantillonnage et analyse multivariable	p 244
3.3.4. Régressions simples et multiples	p 245
3.4. Etudes connexes	p 249
3.4.1. La profondeur de travail : quantification, variabilité spatiale et déterminismes	p 249
3.4.2. Etats initiaux et finals du substrat labouré	p 250
3.5. Conclusion	p 254
3.5.1. Méthodologie	p 254
3.5.2. Le labour sur andosol	p 254
IV- Conclusion à la troisième partie	p 256
 CONCLUSION GENERALE	 p 259
Bibliographie	p 265
Annexes	

INTRODUCTION GENERALE

1. Les sols andiques de la Réunion : substrats de culture fragiles et milieux à fortes contraintes

Les sols issus de l'altération de matériaux volcaniques basiques couvrent des superficies modestes à l'échelle mondiale. Mais leur distribution est très large et ils ont une position privilégiée dans la zone inter-tropicale de part leur aptitude naturelle à la mise en culture et les fortes densités de population qui les occupent (QUANTIN, 1972 ; DELVAUX, 1988).

Les études concernant ces matériaux n'ont débuté qu'à partir de 1950 (Japon, Hawaï, Nouvelle Zélande, Amérique Latine, Antilles...), le plus souvent de façon thématique et fragmentaire ou avec des préoccupations taxonomiques.

Les sols andiques développés sur des cendres volcaniques sont des sols généralement profonds et non pierreux. Ils présentent cependant un ensemble de contraintes très importantes et évolutives,

- soit naturelles : propriétés physiques, hydriques et mécaniques particulières, pentes et agressivité climatique du milieu tropical d'altitude,

- soit liées à la mise en culture : évolution rapide des couches superficielles, érosion importante.

A la Réunion et dans les systèmes à base de géranium et de cultures essentiellement vivrières, ces contraintes occasionnent une diminution progressive de l'aptitude cultural du milieu (au sens de BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1982).

Elle est révélée par des baisses de rendement, mais aussi par une augmentation des coûts pour extérioriser les potentialités du milieu (intrants phytosanitaires en particulier), et par une augmentation des risques (moindres souplesse et sécurité dans le choix et la mise en oeuvre des systèmes de cultures, dans l'obtention des rendements).

L'utilisation agricole du milieu andique d'altitude conduit à des perturbations physiques, chimiques et biologiques des sols. Globalement, le sol n'assure plus ses fonctions dans le processus producteur et c'est la pérennité même des agrosystèmes qui est menacée par inadéquation technique et économique entre systèmes de culture et conditions édaphiques.

Ce constat d'ensemble est effectué par les agronomes du CIRAD, les praticiens de terrain, aménageurs et agriculteurs à la Réunion. Au plan du comportement des sols andiques, il correspond aux observations réalisées dans d'autres régions du monde sur des substrats semblables (QUANTIN, 1972 ; ROSELLO, 1982).

Au delà de considérations pédogénétiques, l'évolution à pas de temps court des sols andiques cultivés apparaît tributaire des itinéraires techniques (anthropisation) et du bioclimat. Ces facteurs de

différenciation touchent les fonctionnements et la morphologie des faciès très variés d'horizons superficiels observés sous culture. En retour, ces propriétés, qui constituent des indicateurs de la fertilité physique du milieu, influencent le fonctionnement des peuplements végétaux et les conditions de mise en culture, mécanisée ou non.

On connaît mal les caractéristiques et les fonctionnements de ces sols, évolutifs sous contraintes (anthropisation, bioclimat). Il s'agit de comprendre les processus fondamentaux en cause, et d'appliquer cet ensemble de connaissances nouvelles à une meilleure adéquation itinéraires techniques - sol, dans un souci de conservation du milieu.

2. La Réunion : cadre de recherche et d'expérimentation

La Réunion constitue un terrain expérimental propice à ce type d'étude : variété des paysages, des productions et des sols. Les andosols et les sols à caractère andique couvrent la moitié de la surface totale de l'île (RAUNET, 1988). Ils représentent près de 80% des terres cultivées et constituent le substrat de spéculations diverses : canne à sucre, géranium, vanille, arboriculture fruitière, cultures vivrières et maraichères, productions fourragères, foresterie.

La restructuration et la protection de l'espace rural, l'intensification et la diversification des productions, constituent quelques clefs d'un avenir socio-économique acceptable pour le Département. La connaissance des fonctionnements, des contraintes, des potentialités des substrats agricoles est indispensable, et tous les secteurs confrontés aux problèmes de développement et d'aménagement sont demandeurs de références techniques dans ce domaine : agriculture, génie civil, équipement, hydrogéologie...

La mécanisation des principales productions agricoles est récente et touche désormais l'ensemble des opérations culturales, en particulier la préparation du sol. Différents problèmes apparaissent, liés à cet essor rapide : au plan technique (inadaptation technique et énergétique du matériel aux conditions locales sévères) comme au plan édaphique (sensibilité accrue à l'érosion et baisse de fertilité des sols en altitude).

L'érosion pluviale est un des problèmes majeurs de l'agriculture d'altitude, les pertes en terre sont considérables en saison des pluies, et touchent au cataclysme lors de cyclones. Cette érosion conduit régulièrement à l'abandon de parcelles lorsque la couche cultivable, raisonnablement fertile, a disparu.

S'agissant de l'Océan Indien et de l'Afrique orientale, d'autres régions volcaniques disposant de substrats agricoles de nature andique sont concernées par les résultats obtenus localement : Comores, Madagascar, Rwanda...

Considérant ces enjeux locaux et régionaux, le **CIRAD** a pris l'initiative de réunir un atelier de travail relatif aux sols andiques, à St Denis de La Réunion en mai - juin 1988. Ce séminaire avait pour objet de faire le point des connaissances et de préparer un vaste programme de recherches afin d'obtenir les références indispensables en science du sol, agropédologie et agromachinisme.

Ce programme a pu disposer d'une aide financière de la Commission de Coordination et d'Orientation de la Recherche dans les Départements et Territoires d'Outre-Mer (**C.O.R.D.E.T.**, Ministère de

la Recherche et de la Technologie, Ministère des DOM-TOM) en 1989 et 90. Il s'inscrit dans le cadre des orientations du Plan d'Aménagement des Hauts et de la politique de coopération régionale (contrat de plan Etat - Région Réunion).

Conformément au programme établi, le **CIRAD** a engagé des études, associant :

- des instituts métropolitains (**INRA** Versailles -*minéralogie, physique des sols*- , **ORSTOM** Bondy -*minéralogie, pédogénèse*- , **IMG-CNRS** Grenoble -*hydrodynamique, variabilité spatiale*- , **CIRAD** Montpellier -*pédogénèse, cartographie*- , **ENSA** Montpellier -*physique des sols, mécanisation*-) ;
- des instituts locaux (**CIRAD** -*agronomie*- , **Université de la Réunion** -*érosion*-) .

Le travail de recherche présenté ici constitue une partie de cet ensemble. Il a été intégralement conduit au CIRAD Réunion, avec l'appui et la collaboration de ces différents partenaires.

3. La démarche de recherche

La démarche entreprise procède de deux soucis :

- décrire les caractéristiques physiques de matériaux andiques de la Réunion et mettre en évidence les fonctionnements qui leur sont associées,
- utiliser cette connaissance à la compréhension des facteurs d'évolution des horizons cultureaux *in situ*, fortement dépendants des conditions de mise en culture, de l'érosion hydrique et du bioclimat.

Ainsi, les milieux naturel et agricole de l'île sont brièvement décrits, s'appuyant sur une littérature abondante et récente. Le contexte pédologique d'ensemble est présenté et un aperçu plus détaillé des sols andiques est proposé. Il permet d'en cerner les propriétés d'ensemble et les analogies avec des substrats similaires d'autres régions du globe.

Les sites d'étude et d'expérimentation sont décrits et situés dans le contexte naturel et les systèmes agricoles.

L'étude se focalise ensuite sur la caractérisation expérimentale des propriétés physiques des matériaux andiques, sous l'angle de leur évolution sous contrainte hydrique et mécanique. En relation avec les variations de potentiel hydrique, l'organisation de la phase solide du sol et son évolution, les propriétés de rétention de l'eau et les systèmes de porosité, puis les propriétés mécaniques sont abordées.

Enfin, une démarche méthodologique originale est développée : les propriétés physiques des horizons cultureaux sont étudiées *in situ* (inter-relations, évolution, impacts des opérations culturales...). A partir d'expérimentations au champs, prenant en compte la variabilité spatiale des différents paramètres, leurs implications dans les processus générateurs d'érosion, ainsi que les interactions sol - outil et sol - plante, sont abordées.

Première partie.
Les milieux naturels et agricoles
Les sols

I. Présentation générale

1. Situation et présentation géomorphologique

L'île de la Réunion se situe par 21°07 de latitude sud et 55°32 de longitude est, dans l'Océan Indien occidental, à 800 km de Madagascar et 200 km de l'île Maurice.

Elle est constituée par la partie émergée d'un énorme stratovolcan intraplaque, établi à partir d'un fond océanique de - 4 000 m et forme une ellipse dont le grand axe mesure 70 km et l'axe transverse 50 km. Sa superficie est de 2 512 km².

L'île se compose de deux massifs volcaniques :

Le Piton des Neiges (3 069 m), massif ancien inactif situé au NW et qui occupe les 2/3 de l'île. C'est un vaste bouclier, aux pentes externes inclinées de 7 à 10 degrés, lacérées de ravines isolant de vastes planèzes. Le centre du massif est profondément entaillé de 3 grandes excavations d'effondrement : les Cirques. L'érosion y est très active (*bad-lands*) et évacue vers la mer de grandes quantités de matériau à l'origine des cônes de déjection à galets.

Le Piton de La Fournaise (2 631 m), massif jeune et actif situé au SE, qui présente également la forme d'un bouclier conique aux pentes régulières inclinées d'une dizaine de degrés vers la mer.

2. Aperçu volcanologique - géologie

2.1. Le massif du Piton des Neiges (CHEVALIER, 1979)

Le Piton des Neiges a émergé il y a 2.1 millions d'années et les dernières phases de son activité datent de 30 000 ans. Deux unités géologiques principales ont été mises en place :

- La série des océanites constitue le bouclier primitif et présente 2 phases d'activité : les océanites anciennes zéolitisées, affleurant au fond des Cirques (phase sous-marine de l'édification); les océanites récentes, formées d'un empilement de coulées d'océanites et de basalte à olivine.
- La série différenciée qui recouvre l'ensemble et se compose de basaltes alcalins et ses produits de différenciation (hawaïtes, mugéarites, benmoréites, trachytes).

Le volcanisme effusif du massif devient explosif dans la phase finale de son activité. C'est la période des laves différenciées concomitante du début de l'activité du Piton de La Fournaise. Les dernières émissions sont de type pyroclastique (-40 000 à -15 000 ans).

Ces dépôts cendreaux ont saupoudré la majeure partie des "Hauts" de l'île (RAUNET, 1991). Ce matériau est hétérogène, constitué de cendrées, scories, ponces, tufs et lapillis. Il a atténué la topographie et constitue un substrat d'altération rapide sur lequel se sont différenciés les sols profonds de l'île, en particulier les sols andiques des versants ouest et sud.

2.2. Le massif du Piton de La Fournaise (BACHELERY, 1981)

Le Piton de La Fournaise s'est édifié il y a 360 000 ans, s'appuyant sur le versant est du Piton des Neiges.

On distingue différentes phases d'édification qui ont contribué à la mise en place de trois systèmes caldeiriques. Ce volcan est de type hawaïen, caractérisé par l'émission de laves très fluides. La présence de niveaux scoriacés étendus et épais atteste de dégazages occasionnels et de phases éruptives phréatiques et phréatomagmatiques.

L'activité du Piton de La Fournaise se poursuit actuellement par des émissions de laves à proximité du cratère principal et sur les versants de la dernière caldeira.

3. Le climat

La Réunion est soumise à un climat tropical austral à deux saisons :

- une saison fraîche et sèche de mai à novembre, durant laquelle l'alizé souffle du S-SE,
- une saison chaude et humide de décembre à avril, influencée par les courants de mousson du NE.

L'influence de ces courants d'est la divise en deux zones : la côte au vent (2 000 à 8 000 mm/an) et la côte sous le vent (600 à 2 500 mm/an). Un gradient altitudinal ajoute à la variabilité spatiale des précipitations, principalement sur le versant est.

En saison chaude, des dépressions tropicales, dont certaines évoluent en cyclones, sont responsables de la plus grande partie du total pluviométrique annuel et conditionnent la grande variabilité inter annuelle observée. Elles accentuent également la disparité est-ouest en raison de leurs trajectoires générales (CADET, 1980).

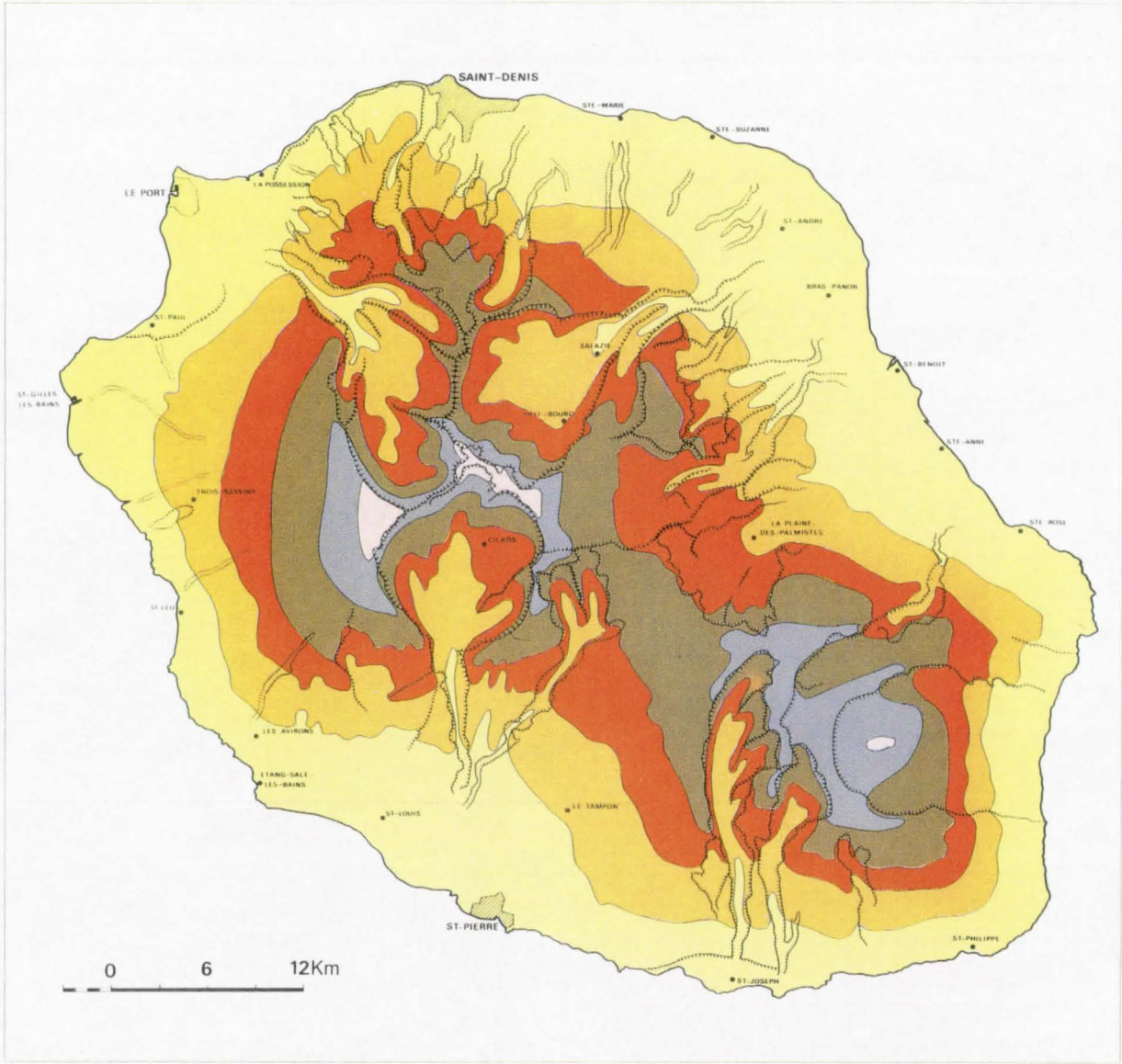
Les pluies de saison sèche présentent une certaine constance inter annuelle car elles sont généralement de nature orogénique, l'humidité de l'alizé se condense sur la masse montagneuse de l'île.

L'humidité relative de l'air reste très élevée avec des valeurs minimales d'environ 50% et des maximales de plus de 90% sur la côte (CADET, 1980). Dans les Hauts de l'ouest, la moyenne est d'environ 85% à 600 m et de 90% entre 1 000 et 1 500 m en raison des brouillards fréquents (GENERE, 1985).

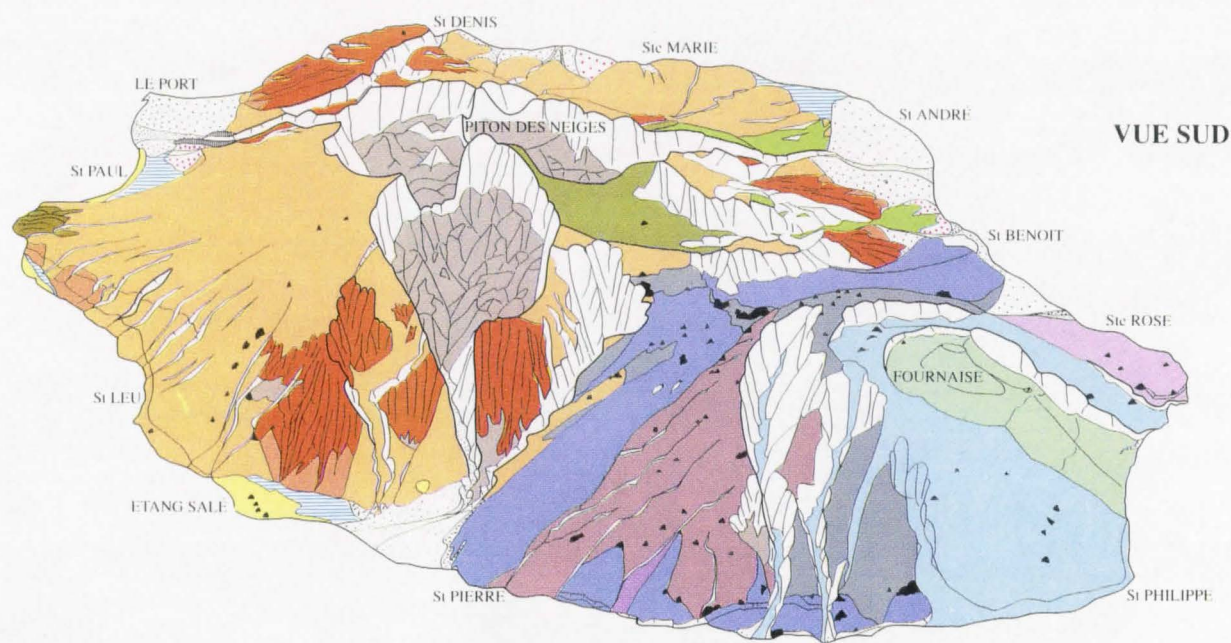
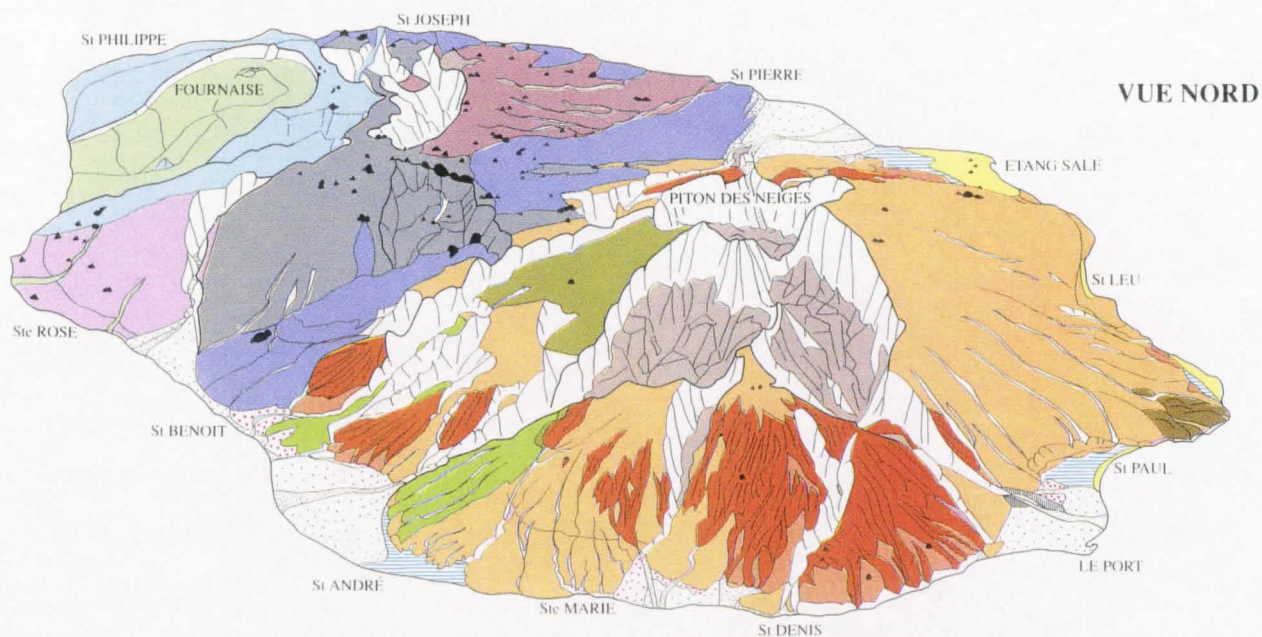
Si l'insolation est importante en zone côtière (8 h/jour en moyenne pour St Denis et St Pierre), - l'enneigement important la réduit à 4 ou 5 h dans les Hauts de l'ouest. L'insolation atteint un minimum vers 1 100-1 500 m d'altitude (3 h 30 /j) (GENERE, 1985).

Les températures varient essentiellement en fonction de l'altitude ; le gradient est de -0.7°C pour 100 m en moyenne. L'amplitude thermique journalière est généralement comprise entre 6 et 9°C sans relation nette avec l'altitude.

HYPSONOMETRIE



PERSPECTIVES MORPHO - GEOLOGIQUES SCHEMATIQUES



PITON DES NEIGES

- Basaltes phase II : reliefs de dissection
- Basaltes phase II : planèzes résiduelles
- Massif des "tufs de St Gilles (phase II)
- Planèzes des phases III et IV
- Planèzes de la phase V
- Planèzes de la phase VI
- Nuées ponceuses phase VI

laves andésitiques

ESCARPEMENTS

FOURNAISE

- Basaltes phase 1
- Basaltes phase 2
- Basaltes phase 3
- Basaltes phase 4
- Basaltes phase 5 et phase 6 (hors enclos)
- Basaltes phase 6 (intra enclos) actuels



CONES DE SCORIE

CIRQUES

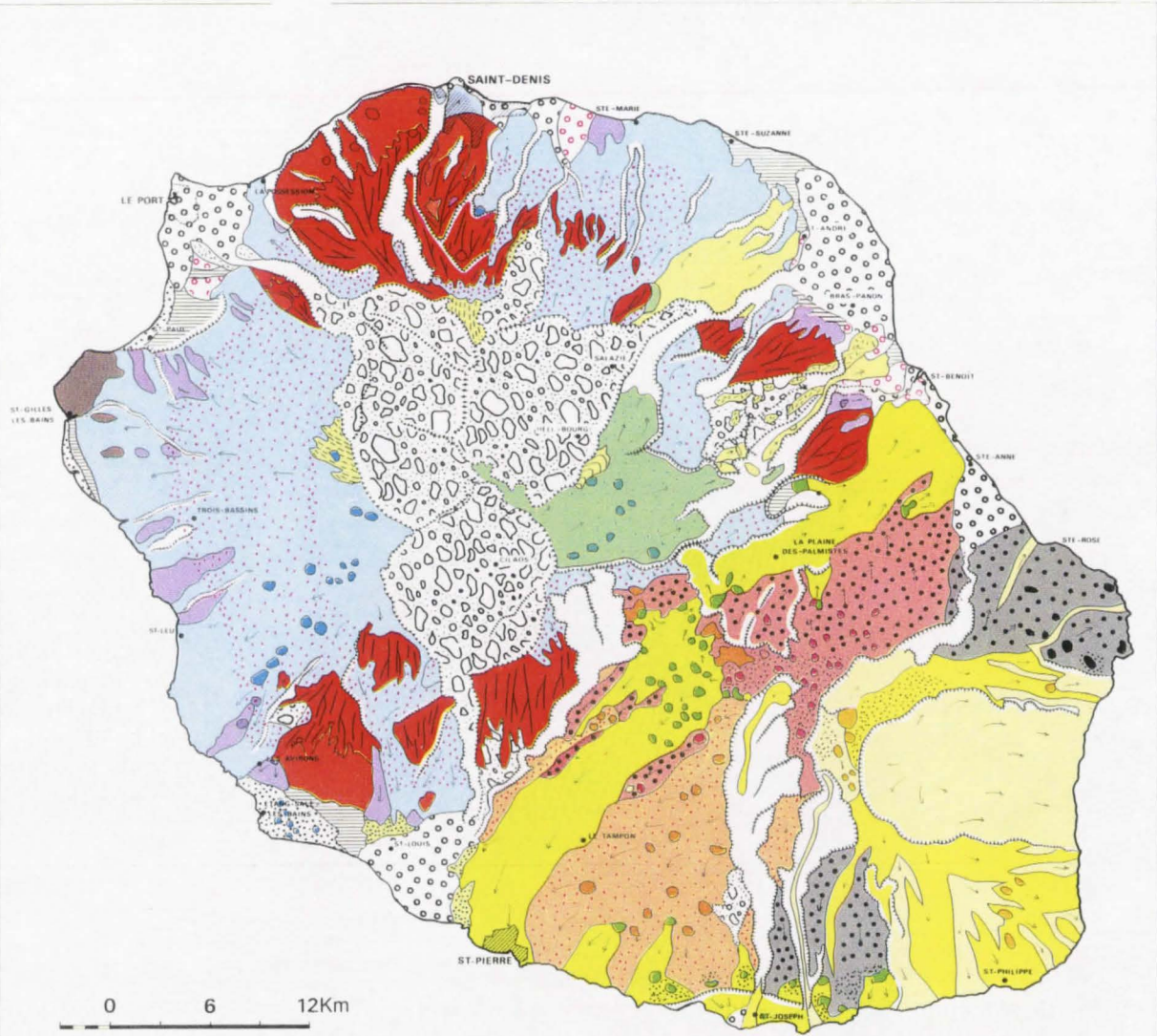
- Complexe morpho-tectonique détritique

FORMATIONS SUPERFICIELLES EXTERNES

- Lahar
- Alluvions anciennes
- Alluvions récentes
- Alluvions actuelles
- Sables littoraux
- Ennoyage fin

CARTE MORPHO-GEOLOGIQUE

Prise en compte et modifications des travaux de G. BILLARD (1975), L.CHEVALLIER (1979), P.BACHELERY (1981).

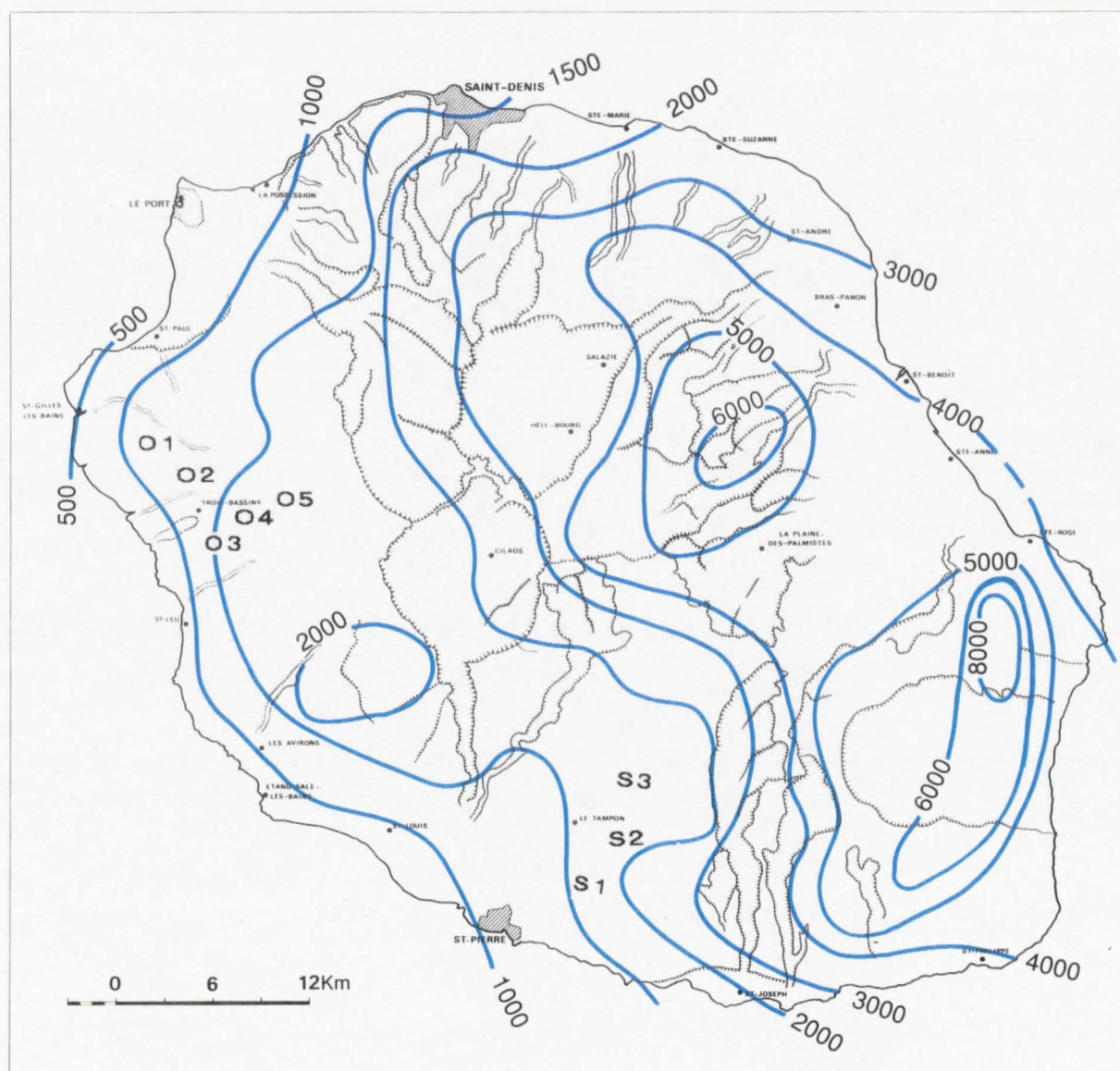


PITON DES NEIGES				PITON DE LA FOURNAISE				
PHASES	PETROGRAPHIE	TYPE D'EMISSION	TECTONIQUE EROSION - ALLUVIONNEMENT	AGES APPROXIMATIFS	TECTONIQUE	TYPES D'EMISSION	PETROGRAPHIE	PHASES
I	OCEANITES ZEOLITISEES	HYALOCLASTITES ET "BRECHES PRIMITIVES" (VISIBLES DANS LES "CIRQUES")		3 000 000	FLANC EST DU PITON DES NEIGES SERVANT DE SUBSTRATUM AUX EMPLACEMENTS DE LA FOURNAISE ET FAVORISANT LES GLISSEMENTS ET CISAILLEMENTS EMBOITES (PSEUDO-CALDERAS) SUCCESSIFS DES VERSANTS ORIENTAUX			
II	OCEANITES (Bouclier primitif)	EMPLIEMENT EPASIS DE COULEES STRATOIDES (AA ET PAHOEHOE) DU "BOUCLIER PRIMITIF"	1ere CALDERA	2 100 000 600 000				
	"TUF DE ST GILLES"	FISSURAL-EXPLOSIF - PHREATIQUE		430 000 400 000				
		CALME VOLCANIQUE	ALTERATION, GLISSEMENTS ET EFFONDEMENTS SUB-MERIDIENS DU FLANC OCCIDENTAL DU VOLCAN-BOUCLIER	350 000		COULEES "AA" ET "PAHOEHOE"	OCEANITES ↓ HAWAITES	1
III	HAWAITES PORPHYROIDES (Basalte "Plintade")	COULEES "AA" ET "PAHOEHOE"	EROSION REGRESSIVE ACTIVE DES COULEES II. RECOUPANT LOCALEMENT LA CALDERA, PERMETTANT LA "SORTIE" DES COULEES IV (Braz de Liane, Trou Maloua, Riviere St-Denis, Grand Plate, Le Tapage...) EFFONDEMENTS LOCALISES (Plaine des Mares, Dos d'ane...) ENVAHIS PAR COULEES IV	250 000 230 000	1ere CALDERA			
IV	MUGEARITES APHYRIQUES	COULEES "AA" PARFOIS AUTO-BRECHIEES	2e CALDERA	73 000	EFFONDREMENT DE LA PLAINE DES PALMISTES RECOUPANT LE NORD DE LA 1ere CALDERA	COULEES "AA" ET "PAHOEHOE" SE DEVERSANT DANS LA PLAINE DES PALMISTES ET LA PLAINE DES CAFRES	OCEANITES ↓ HAWAITES	2
			CONSTRUCTION DES CONES DE DEJECTION "ANTIENS" (Riviere des Pluies, du Mt. des Marousins, des Galets)	50 000		EPISODES EXPLOSIFS		
V	"TUF JAUNE" "Niveau repere" ET CENDRES LITEES	ERUPTIONS FISSURALES PHREATO-MAGMATIQUES (LIEES A LA FORMATION DE LA 2e CALDERA)		40 000	2e CALDERA (Caldera des Sables)			
	BENMOREITES	COULEES AUTO-BRECHIEES (REMPLISSAGE DE LA 2e CALDERA)		35 000	OUVERTURE VERS L'EST PRESQUE JUSQU'A 160 (DE Ste ANNE A St JOSEPH) DE LA CALDERA DES SABLES	COULEES "AA" ET "PAHOEHOE" EPISODES EXPLOSIFS	OCEANITES ↓ HAWAITES	3
	CENDRES	VOLCANISME EXPLOSIF		15 000		COULEES "AA" ET "PAHOEHOE" HORS CALDERA (Coulees les plus recentes de l'axe : Plaine des Cafres - Plaine des Palmistes)		4
VI		COULEES AUTO-BRECHIEES (EXTERIEURES A LA 2e CALDERA) COULEES IGIMBRITIQUES (Riviere des Roches-Deux Mamelles) COULEES TRES VISQUEUSES (Bleuve) "TUF SODES" (Maido) NUES PONCEUSES (St. Louis)	EROSION REGRESSIVE ET OUVERTURE NORD-ORIENTALE DE LA 2e CALDERA AUX NIVEAUX DES RIVIERES DU MAT. DES ROCHES, DES MAROUSINS. PASSAGE DES COULEES VI	12 000		EPISODES EXPLOSIFS, PHREATO- MAGMATIQUES OU NON, VERS 7 000 ET 9 000 ANS		5
			EROSION - EFFONDEMENTS CIRQUES - RIV DES ROCHES - RIV DES PLUIES - GRAND BASSIN - TREVILAYE - ENTRE DEUX	10 000	GLISSEMENT DES FLANCS EST ET SUD PSEUDO CALDERA LIMITEE PAR LES RAVINES BASSE-VALLEE ET CONSTANTIN.	COULEES "AA" ET "PAHOEHOE" REMPLISSANT LA PSEUDO CALDERA OUVERTE VERS LE SUD-EST	OCEANITES	6
			LAHAR DE LA RIVIERE DES GALETS	8 000			BASALTES OLIVINE	
			CONES DE DEJECTION "RECENTS"	5 000			BASALTES "COTECTIQUES"	
			ENNOYAGES ALLUVIAUX FINIS		FORMATION DE LA 3e CALDERA ("ENCLOS" GLISSEMENT DES GRANDES PENTES (GRAND BRULE)	COULEES "AA" ET "PAHOEHOE" EPISODES EXPLOSIFS, PHREATO- MAGMATIQUES DONT CELUI DE 3 000 ANS ("CENDRES DE BELLECOMBE")		
			SABLES LITTORAUX	0				

Carte 4

PLUVIOMETRIE MOYENNE ANNUELLE (en mm)

période 1958 -1980



O1 O2 O3 O4 O5 = séquence ouest

S1 S2 S3 = séquence sud

4. La végétation naturelle (CADET, 1980)

La végétation est nettement zonée en ceintures subcirculaires, s'étageant en fonction de l'altitude et de l'exposition des versants.

Les formations végétales naturelles (endémiques ou introduites) occupent principalement les Hauts, les ravines et le littoral ouest sec.

La végétation forestière s'étend dès 700 m dans l'est et commence par une bande forestière d'espèces introduites (*Psidium cattleianum*, *Eugenia jambos*...) et passe ensuite à une forêt primitive à bois de couleur, de type mégatherme hygrophile (*Cyathea sp*, *Pandanus montanus*) puis mésotherme (*Acacia heterophylla*, *Nastus borbonicus*).

Dans l'ouest, une bande littorale sèche s'étend entre Etang-salé et Le Port (pluviométrie inférieure à 1 000 mm), elle est couverte d'une savane semi-aride herbeuse (*Heteropogon contortus*, ravagée par des feux saisonniers) ou arbustive (*Leucaena glauca*). Le développement des périmètres irrigables réduit progressivement cette savane.

Entre 1 200 et 2 000 m s'étend tout d'abord une zone à *Acacia decurrens* et *Lantana camara*, sujette à défrichement pour l'installation de nouvelles zones prairiales; puis l'étage caractéristique à tamarins des Hauts et nattes (*Acacia heterophylla*, *Nastus borbonicus*).

L'ensemble des secteurs de haute altitude (au delà de 2 000 m) est couvert par une végétation éricoïde à base de *Philippia montana*.

On notera des peuplements récents de production (cryptomeria, tamarin, camphrier, bois de couleur) et de protection (filaos), gérés par l'Office National des Forêts.

5. Cultures et productions agricoles (D.A.F., 1990)

Deux systèmes de production sont décrits, le système cannier en raison de son importance (plus de 50% de l'espace agricole occupé par les exploitations cannières, le sucre reste la première exportation en volume et en valeur -80%-), et le système à base de géranium et cultures vivrières des Hauts, superposé géographiquement à la couverture de sols andiques d'altitude à fortes contraintes, sujet de l'étude.

5.1. La canne à sucre

La canne à sucre domine largement dès le littoral et jusqu'à 500 m dans le nord, l'est et le sud, de 400 à 1 000 m dans l'ouest (33 200 ha en 1990 pour une S.A.U. totale de 63 600 ha). La superficie moyenne des exploitations est de 3.17 ha. Le sucre en est le produit principal (192 000 tonnes en 1990, essentiellement exporté), accompagné de production de rhum et dérivés (mélasses ...).

Malgré les contraintes (morcellement du parcellaire, pente...), c'est le système de culture le plus mécanisé, particulièrement de façon collective (SICA, CUMA, groupements informels). Les travaux mécanisés peuvent assurer l'ensemble des opérations culturales lorsque les conditions du milieu physique le

permettent (défrichage, épierrage, préparation du sol, plantation, traitements phytosanitaires et pesticides, récolte...) (SIEGMUND, 1990).

D'autres spéculations s'associent au système cannier dans l'est : la vanille (700 quintaux produits en 1991), les fruitiers tropicaux (banane et ananas). Dans le sud et le nord, les cultures légumières se développent (3 550 ha en 1990). En altitude, la polyculture-élevage se substitue par place à la canne (Hauts de l'est, de l'ouest et sud de l'île).

5.2. Les systèmes de culture à base de géranium

Le géranium (pélargonium à parfum), plante ligneuse buissonnante, sarclée et peu couvrante, était considérée comme la culture pivot des zones d'altitude (ouest principalement et sud). Cette spéculation est aujourd'hui menacée par la baisse de fertilité, l'érosion des substrats, les problèmes phytosanitaires, ainsi que par de profondes mutations socio-économiques (diminution des actifs agricoles de la zone, "professionnalisation" des agriculteurs séduits par d'autres spéculations : élevage, horticulture au sens large...).

En 1990, le géranium couvrait 1 600 ha, dont plus de 1 400 dans la zone des Hauts de l'ouest, en une bande de 70 km s'étalant entre 1 000 et 1 200m. Il s'associe à des cultures vivrières (maïs, haricot et légumes) et à des fruitiers tempérés. 23.3 tonnes d'huile essentielle sont produites en 1990. Les contraintes physiques (pentes, fertilité faible des sols érodés, enclavement des exploitations...) et socio-économiques (faible niveau de formation des exploitants, taille des exploitations, mode de faire-valoir, trésorerie défaillante...) sont autant de freins au développement agricole de ces zones (MICHELLON, CHASTEL, 1988).

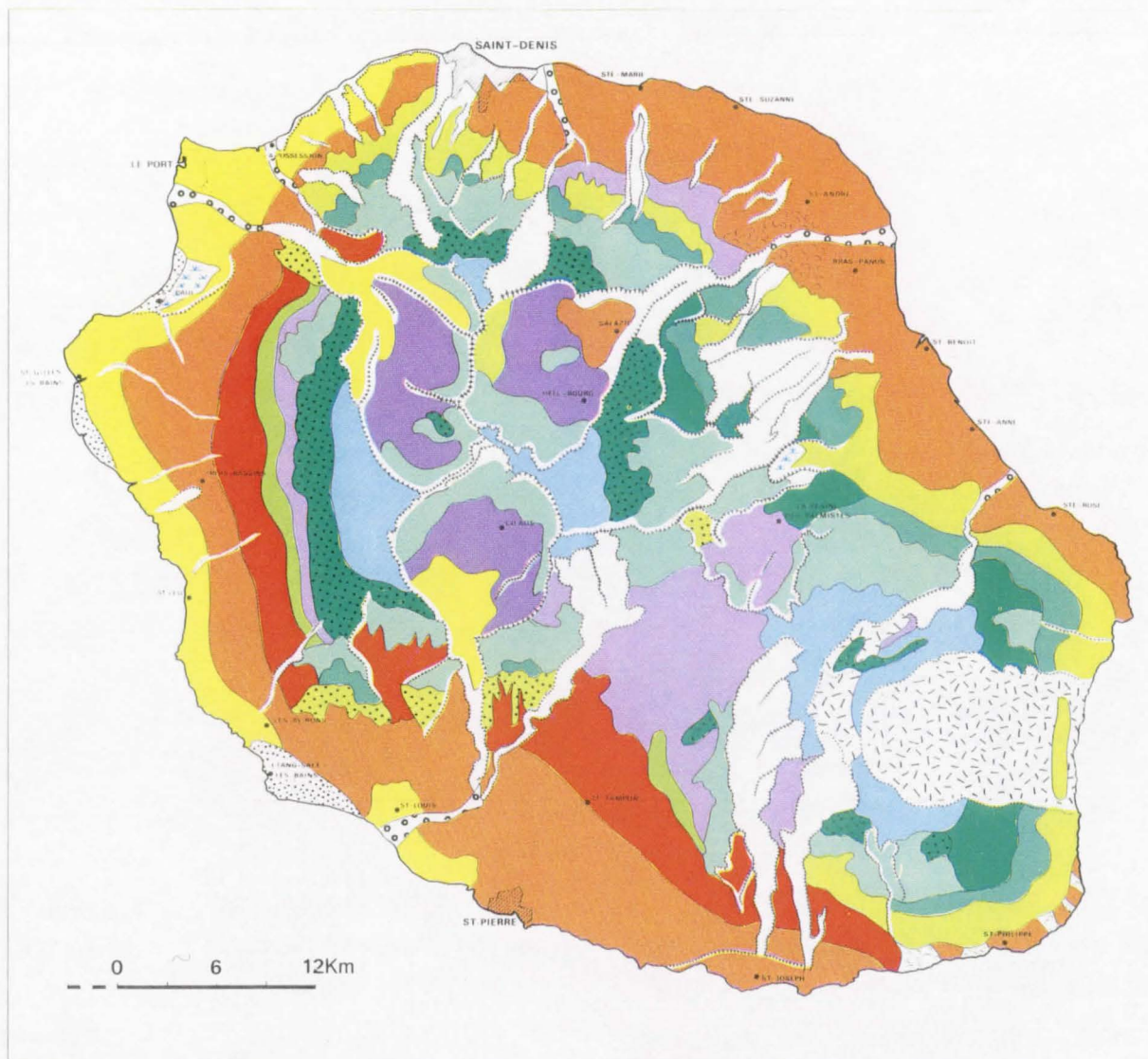
Traditionnellement, la culture du géranium comporte un ensemble d'opérations manuelles sollicitant une main-d'oeuvre nombreuse (100-150 j/ha/an pour le sarclage par exemple). Ceci s'ajoute aux contraintes pré-citées, au détriment d'opérations nécessaires à l'augmentation de production (apports d'intrants limités par la trésorerie...).

La mécanisation des traitements phytosanitaires se développe sous l'impulsion des organismes de Développement et une petite mécanisation des semis (cultures vivrières associées) commence à apparaître. Les groupements d'agriculteurs, formels ou non, pour l'acquisition et l'utilisation de machines sont difficiles à créer (enclavement, éloignement). La mécanisation lourde est limitée au travail du sol avant plantation. Elle sollicite essentiellement du matériel issu de la zone cannière (groupements coopératifs) et semble subordonnée à l'attribution d'aides locales ou d'état (subventions). Dans un schéma d'intensification, une chaîne de mécanisation peut être envisagée : travail du sol, plantation, récolte, mais reste fortement tributaire des conditions du milieu. La cellule motrice la mieux adaptée à ces milieux pourrait être le motoculteur (PIROT et OUF, 1987).

Depuis plusieurs années, la recherche (CIRAD) et le développement (Chambre d'Agriculture, A.P.R., S.A.F.E.R.) s'associent pour proposer des moyens pour augmenter la production agricole. Ces solutions passent par la mise au point et la vulgarisation d'itinéraires techniques adaptés et doivent permettre un nouvel essor pour une spéculation dont on connaît les potentialités importantes et dont l'huile essentielle reste, en valeur, la deuxième production agricole d'exportation après le sucre (CHASTEL, 1990).

Dans cette optique, les aspects de protection et de restauration des potentialités agricoles du milieu physique sont essentiels.

VEGETATION NATURELLE PRIMAIRE ET SECONDAIRE (d'après Th. CADET)
ET ACTIVITÉS AGRICOLES



VEGETATION NATURELLE

- Absence de végétation (ou lichens, fougères)
(volcanisme actuel)
- Végétation éricoïde d'altitude
- Forêt mesotherme
- Forêt megatherme hygrophile
- Fourré très hygrophile à Pandanus
- Forêt à Acacia heterophylla (Tamarins)
- Forêt secondaire à Goyaviers et Jamrose
- Forêt secondaire à Goyaviers dominants
- Savane semi - aride herbeuse ou arbustive
à Leucaena (végétation secondaire)
- Végétation marécageuse
- Végétation indifférenciée des escarpements
- Lits actuels des cônes de déjection

ACTIVITES AGRICOLES ET BOISEMENTS

- Canne à sucre
- Géranium et cultures diverses (légumes, maïs, tabac, fruitiers, fleurs, vétiver...)
- Boisements d'Acacia decurrens
- Paturages d'altitude dominants
- Cultures des "cirques" (sur "Ilets") et végétation des zones ravinées
- Vanille
- Boisements de Filaos sur sables littoraux

5.3. Autres productions

On notera le développement récent et significatif de deux secteurs :

- l'élevage (naisseur et laitier) entre en concurrence avec le géranium dans les zones d'altitude de l'ouest (1 300-1 500 m), dans les Hauts du sud et dans la zone des Plaines, ou avec la canne dans le nord. La production fourragère qui lui est associée est fortement mécanisée, depuis la mise en valeur foncière et la préparation des sols jusqu'aux chaînes de récolte et de conservation des fourrages. La profession est bien organisée, motivée et d'un bon niveau de technicité.
- les cultures légumières et fruitières, alternatives à la canne dans le sud (nouveaux périmètres irrigués) et le nord. Souvent récemment installées sur d'anciens périmètres canniers, les exploitations maraîchères sont dynamiques et bien équipées, de façon individuelle ou en petits groupements (multiplication des CUMA-maraîchage).

En revanche, quelques plantes traditionnelles ont vu leur production chuter ces dernières années ou sont même menacées à court terme (tabac, vétiver...).

II. Les sols

1. Présentation générale

RAUNET (1988) considère que les andosols et les sols à caractère andique couvrent près de 50% de l'ensemble de l'île.

La première prospection pédologique de 1960 effectuée par RIQUIER classait ces sols en ferralitiques bruns ou beiges. La connaissance analytique des matériaux andiques se précise dès cette époque et l'on décrit des séquences altitudinales et climatiques de sols développés sur matériaux volcaniques dans de nombreux pays (QUANTIN, 1972; ROSELLO, 1982).

La Réunion n'échappe pas à ces modèles et des études complémentaires admettent la présence de minéraux mal cristallisés ou amorphes (BERTRAND, 1972). La toposéquence des sols du flanc ouest du Piton des Neiges est décrite, et montre le déterminisme de l'altitude, donc du climat, sur le passage progressif de sols ferralitiques aux andosols, puis à une podzolisation à haute altitude (ZEBROWSKI, 1975). Une nouvelle carte est établie à partir de ces résultats et fait apparaître les sols ferralitiques andiques et les andosols (RIQUIER et ZEBROWSKI, 1975). Une série d'études à l'échelle du 1/25 000 est réalisée (BROUWERS, RAUNET, 1981; BROUWERS, 1982; BROUWERS, 1984) et permet d'aboutir à une carte morphopédologique, établie en 1988 à l'échelle du 1/50 000 (RAUNET, 1988).

GENSE (1976) définit les séquences minéralogiques d'altération dominantes :

- Sur les versants humides :

Gibbsite+Allophanes / Halloysite / Métahalloysite.

- Sur le versant ouest :

Gibbsite+Allophanes / Halloysite / Métahalloysite / Smectites.

Ces séquences d'altérites correspondent bien aux successions générales de sols observées (RAUNET, 1988) :

Dans l'ouest depuis le littoral, se succèdent vertisols, bruns ferruginisés, bruns, bruns andiques, andosols.

Sur les versants plus humides, la séquence schématique est la suivante : sols ferralitiques à argiles halloysite et kaolinite, ferralitiques andiques, andosols.

Une micro-podzolisation est possible sur les andosols perhydratés d'altitude, tributaire de la présence d'un horizon de phytolithes de quelques dizaines de centimètres (pseudo "A₂" limoneux et siliceux provenant de la végétation⁽¹⁾).

(1) L'origine de cet horizon (mascareignite) est incertaine : biodégradation naturelle et accumulation ou résidus de vastes incendies des millénaires précédents...

LEGENDE

I - LANDES ERICOIDES DE HAUTE ALTITUDE

- Placages cendreaux à andosols perhydratés cryptopodzoliques, saupoudrages de lapilli à andosols vitriques, rocaïlles et dalles affleurantes, cônes de scoriés...

II - COULEES DE LAVE A MATELASSAGE CENDREUX QUASI CONTINU

- Sols faiblement ferrallitiques andiques (non perhydratés) sur alluvions et cendres mélangées (reptation et colluvionnement)

- Sols bruns andiques sur cendres

- Andosols désaturés non perhydratés chromiques sur cendres

- Andosols désaturés perhydratés chromiques sur cendres (avec ou sans "avoûne")

- Andosols désaturés perhydratés chromiques cryptopodzoliques sur cendres, à "mascaregnite".

III - COULEES DE LAVE FAIBLEMENT ALTEREES A RECROUVREMENT CENDREUX PEU EPAIS ET DISCONTINU (NOMBREUX AFFLEUREMENTS)

- Sols bruns sur "gratons" désagrégés

- Sols bruns andiques sur cendres

- Andosols désaturés non perhydratés sur cendres

- Andosols désaturés perhydratés cryptopodzoliques sur cendres

IV - COULEES DE LAVE NON ALTEREES, SANS RECROUVREMENT CENDREUX

- Sols peu évolués humifères (litière) sur "gratons" légèrement désagrégés

- Coulées brutes et cônes de scoriés.

V - COULEES DE LAVE ALTEREES, SANS RECROUVREMENT CENDREUX

- Relief de dissection, à sols peu évolués sur matériau altéré remanié colluvionné et à reliques ferrallitiques.

- Planèzes découpées résiduelles à sols ferrallitiques épais

- Planèzes à sols faiblement ferrallitiques

- Planèzes à sols bruns non ferruginisés

- Planèzes à sols bruns ferruginisés et sols ferrallitiques

- Planèzes à vertisols et affluements caillouteux.

VI - "TUFES" DE SAINT-GILLES

- Sols bruns peu épais et sols vertiques

VII - ZONES EFFONDREES DES CIRQUES A MATERIAUX DETRITIQUES

- Zones à ravinement très actif ("bad-Lands") et "llets" à sols bruns ou andosols caillouteux.

VIII - CÔNES DE DEJECTION ("ALLUVIONS A GALETS")

- Cônes "anciens" à sols caillouteux faiblement ferrallitiques

- Cônes "anciens" à sols caillouteux vertiques

- Cônes récents à sols sablo-caillouteux andiques

- Cônes récents à sols sablo-caillouteux peu évolués.

IX - CUVETTES LITTORALES A ENNOYAGE ALLUVIAL ARGILO-LIMONEUX

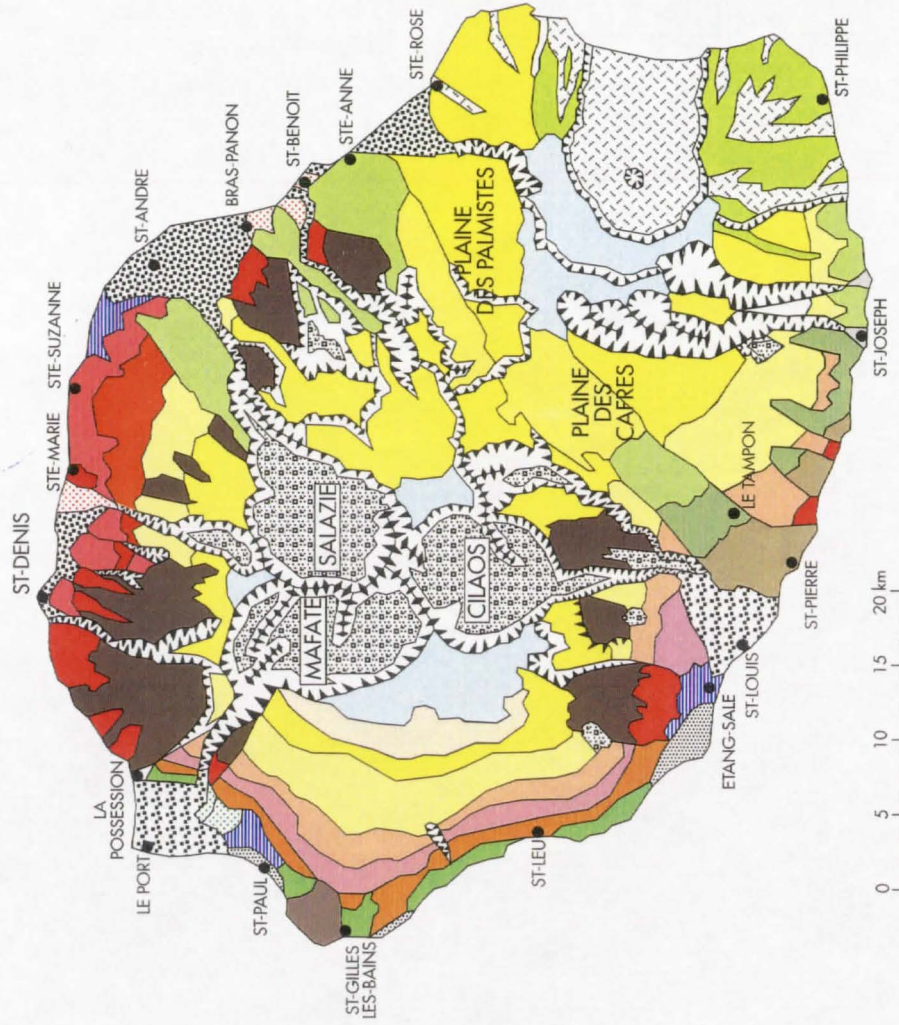
- Sols argileux plus ou moins hydromorphes

X - SABLES LITTORAUX (CORDONS SABLEUX EOLIENS)

- Régosols et sols peu évolués sableux (basaltiques ou madréporiques)

XI - "REMPARTS"

- Lithosols et placages colluvionnés brunifiés ou andiques



IRAT
M. RAUNET
1989

ILE DE LA REUNION

CARTE MORPHO-PEDOLOGIQUE

2. Principaux sols et caractéristiques

Actuellement, les principaux sols cultivés sont des sols andiques (est, Hauts de l'ouest et du sud), des sols ferralitiques (nord et sud) et des sols brunifiés (ouest et sud).

Les sols colluvionnés et caillouteux des Cirques, souvent andiques ou brunifiés, constituent un substrat agricole à part, très morcelé (îlets), discontinu, varié et présentant des contraintes énormes pour la mise en culture (pierrosité, pente, enclavement, morphodynamique active).

Les pédogénèses vertique et fersiallitique (associée aux sols bruns ferruginisés) sont peu représentées et concernent les zones basses de l'ouest, à saison sèche marquée. La mise en culture encore très limitée de ces milieux va se développer à court terme avec l'extension progressive des périmètres irrigués.

Les sols peu évolués sur alluvions récentes à galets et les sols argileux sur alluvions fines (souvent hydromorphes) occupent des zones marginales au plan de la mise en valeur agricole.

Figure I.1. Types de couverture à l'affleurement et pourcentage de la surface totale (estimation d'après RAUNET, 1988) :

	%
Andosols perhydratés et non perhydratés :	32
Sols bruns et ferralitiques andiques :	6
Sols ferralitiques :	11
Sols bruns :	4
Sols bruns ferruginisés et fersiallitiques :	2
Vertisols et sols vertiques :	1
Sols hydromorphes sur alluvions fines :	1
Sols sur alluvions à galets récentes :	5
Sols colluvionnés des cirques :	7
Lithosols d'altitude, de rempart, sur coulées peu altérées :	25
Coulées actuelles, subactuelles non altérées :	5
Régosols sur sables littoraux :	1

RAUNET (1991) présente une description détaillée de l'ensemble de ces sols, resitués dans leur environnement. Les caractéristiques des andosols sur cendres, objets centraux de l'étude, sont cependant développées ici.

3. Les andosols

3.1. Position dans les classifications

Dans la classification américaine (USDA, Soil Taxonomy, 1975), les andosols sont désignés sous le nom d'Andepts (sous-ordre) et classés dans l'ordre des Inceptisols (sols peu évolués), comme les sols bruns tropicaux (Trophept). Des propositions successives entre 1978 et 1991 (International Committee

on the Classification of Andisols, PARFITT et CLAYDEN, 1991) font évoluer le sous-ordre en un ordre : les Andisols, classés selon des critères plutôt climatiques.

La classification française (CPCS, 1967) classe d'emblée les andosols au plus haut niveau (classe des Andosols), faisant ressortir l'originalité de leurs propriétés liées à la présence d'une fraction minérale amorphe. En 1972, un groupe de travail sur les andosols à redéfini et remodelé les diverses subdivisions, c'est la classification actuellement utilisée par les pédologues (dont RAUNET pour la carte réalisée en 1988 à La Réunion).

Les travaux de remplacement de la classification CPCS par un nouveau Référentiel Pédologique sont en cours. Les andosols constituent désormais un Grand Ensemble de Référence : les Andisols (ou sols andiques) (QUANTIN, 1990). Les nomenclatures adoptées ici se réfèrent à ces travaux (mise à jour d'avril 1990). Les profils étudiés sont classés et décrits au chapitre II.4.2. (figure I.6. et profils).

3.2. Substrat géologique et genèse

3.2.1. Les cendres volcaniques: substrat d'altération rapide

Les andosols de La Réunion sont rarement formés directement sur des coulées basaltiques massives, mais sur des niveaux cendreux successifs empilés, d'épaisseur variable (jusqu'à plusieurs mètres), correspondant chacun à un événement volcanique (-40 000 à -15 000 ans).

On observe en particulier entre 20 et 60 cm de profondeur, un niveau de tuf à débris de feldspaths (BACHELERY, 1981), compact et peu altéré. Il est considéré comme l'un des derniers apports pyroclastiques, ayant recouvert la majeure partie des Hauts de l'île vers -30 000 ans.

Ces rajeunissements par des apports successifs occasionnent une différenciation centripète (ROSELLO, 1984), puisque les niveaux profonds sont les plus altérés, appauvris en bases et en silice.

La nature minéralogique de ces dépôts est essentiellement basique, elle comprend des fragments de pâte microlithique basaltique, des phénocristaux isolés de feldspath, d'olivine, de clinopyroxène, de magnétite et d'ilménite (ROSELLO, 1984; DENAIX, 1989), et des éléments vitreux dont les teneurs en fer sont fréquemment élevées.

3.2.2. L'andosolisation : processus dynamique et instable

Le processus fondamental d'altération biogéochimique conduisant à l'andosolisation est une hydrolyse acide des verres volcaniques qui produit des minéraux para-cristallins (allophane, imogolite, hisingérite, ferrihydrite) sur lesquels sont adsorbés et stabilisés les acides humiques (QUANTIN, 1990). Les complexes organo-minéraux et les phases en solution, chargées en ions hétérogènes inhibent la formation de minéraux bien cristallisés tout en permettant la désaturation en bases et la désilicification. L'état d'hydratation élevé et permanent favorise la formation abondante et renouvelée de ces gels.

En revanche, des alternances climatiques humides et arides favorisent la destruction des complexes organo-minéraux (SIEFFERMANN, 1969) ; les acides humiques sont minéralisés, les solutions se concentrent et les conditions sont réunies pour l'argilo-génèse et la cristallisation des hydroxydes. Ces processus sont concomitants à l'andosolisation dans les sols andiques des secteurs à saison sèche marquée.

En altitude, la perhydratation et les températures plus basses favorisent l'acido-complexolyse et conduisent à une podzolisation qui s'ajoute à l'andosolisation profonde.

3.3. Traits morphologiques et analytiques (QUANTIN, 1972; RAUNET, 1991)

3.3.1. Des profils différenciés, polygéniques

Hormis les andosols vitriques peu épais des secteurs d'altitude, les andosols ont des profils différenciés et souvent complexes à la Réunion, d'où certaines difficultés de description :

- les empilements successifs de niveau de cendres ont rajeuni les profils, recouvrant des sols plus anciens déjà andiques ou ferralitiques (développés sur coulée massive). Ces différentes cendres étant elles mêmes altérées, l'horizon M originel n'est pas représenté et l'horizon C montre un faciès bigarré, où alternent des couches très altérées, des niveaux compactées ou indurées (tufs), de granulométries et de couleurs variables ;
- la transition entre l'horizon structural allophanique Sa (ancien (B) cambique) et les horizons d'altération C des matrices cendreuses n'est pas nette, d'autant que des processus morphodynamiques locaux (glissements, coulées boueuses) mélangent cendres et blocs de tuf ou de basalte dans les profils ;
- En zone agricole, l'érosion intense a souvent évacué l'horizon superficiel Aa. L'horizon Sa tronqué affleure et la couche superficielle évolue rapidement sous l'effet de la dessiccation et de la mise en culture : couleur, agrégation, comportements physiques (thixotropie, rétention de l'eau...) et mécaniques sont modifiés⁽²⁾.

3.3.2. Profil-type et description des horizons cultureux

Comparés aux autres types de sols, les andosols sur cendres présentent dans l'espace une relative homogénéité morphologique résultant de la régularité du saupoudrage pyroclastique du Piton des Neiges (RAUNET, 1991).

Le profil général des andosols agricoles est constitué de 3 horizons principaux successifs : Aa ou LAa ou LSA⁽³⁾ ; Sa ; C (figure 1.2).

La pierrosité de ces sols est généralement nulle, on trouve parfois en surface des morceaux de tuf (troncature par érosion du profil, ou colluvionnement), plus rarement des reliquats altérés de basalte ramenés en surface au niveau de zone de colluvionnement ou de solifluxion.

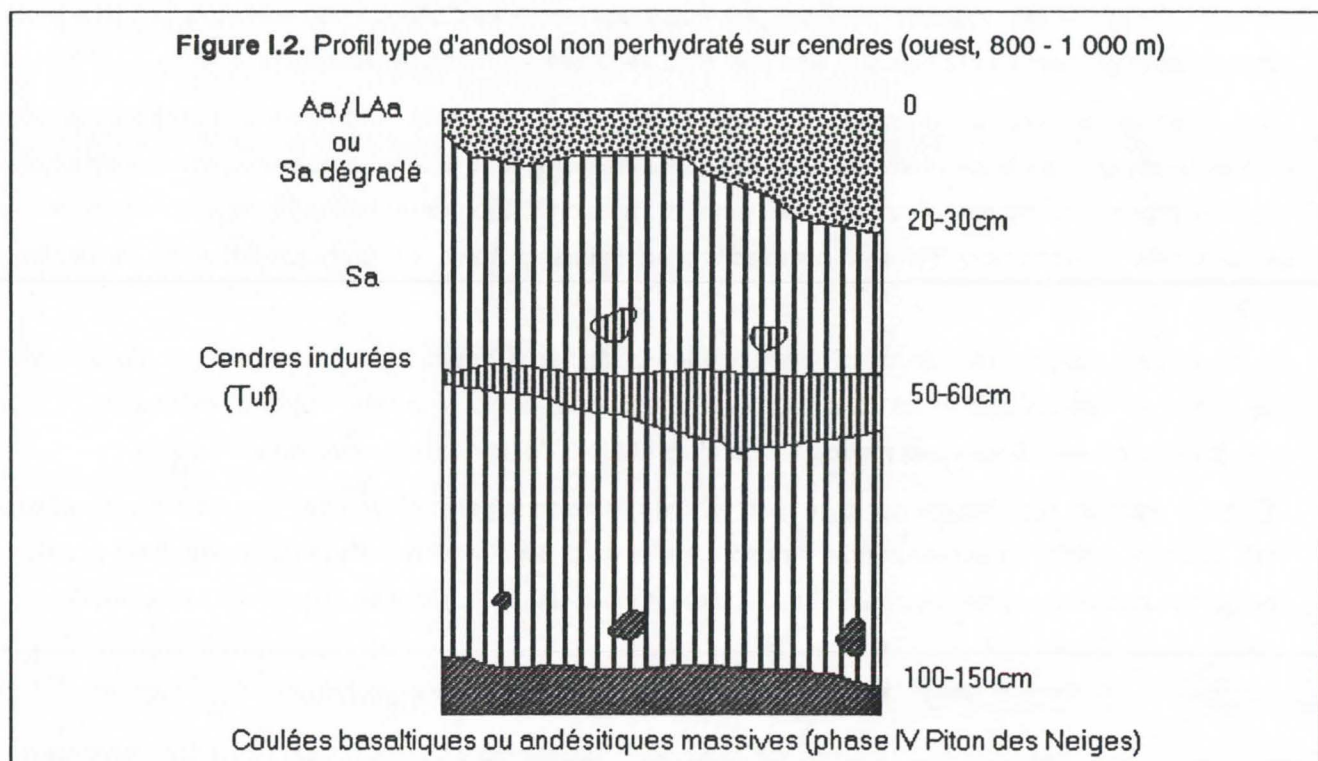
L'horizon Aa, d'une profondeur de 20 à 30cm, a une couleur brun-foncé. Les taux de carbone organique sont élevés (5 à 15%). Sous friche ou prairie, sa couleur est plus foncée, l'enracinement y est très dense et l'activité biologique intense (lombricidés et mésofaune variée). La structure est bien marquée, en gros agrégats grumeleux, cohérents et frais. Sous culture, l'horizon présente une structure finement grumeleuse, peu cohérente, à farineuse, pulvérulente en saison sèche, poreuse mais hydrophobe et facilement mobilisable par les eaux de ruissellement. Les faciès structuraux superficiels sont très variés et dépendent des itinéraires, de l'érosion...

(2) Cette couche superficielle sera notée LSA.

(3) Le Préfixe L avant le type d'horizon désigne des perturbations associées à la mise en culture (ancien suffixe p): Ap devient LA par exemple (Référentiel Pédologique Français, version avril 1990).

La masse volumique apparente sèche est proche de 0.8 à 0.9. La texture est limono-sableuse au toucher.

L'horizon d'altération Sa, de profondeur variable (50 à plus de 100 cm) est de couleur brun-jaune à brun clair. Son toucher onctueux, non collant et limoneux caractéristique est dû aux gels hydratés organo-minéraux, alors que sa texture réelle est toujours constituée de plus de 50% de particules de dimension inférieure à 2 μm .



Sa structure est continue, d'aspect "mie de pain" ; les pores sont très fins, parfois à peine visibles à l'oeil et essentiellement d'origine faunique. En saison sèche, on détache facilement des mottes polyédriques subanguleuses qui paraissent ressuyées et passent à l'état de boue fluide, en libérant de l'eau sous la pression des doigts (thixotropie). En saison humide ou en zone perhumide, l'aspect est semblable, très frais, sans jamais paraître engorgé.

La masse volumique apparente sèche est de l'ordre de 0.3 à 0.5, la porosité totale très élevée, dominée par la microporosité (indice des vides : 4 à 7 à la capacité au champ).

La teneur en carbone est encore élevée et dépend fortement de l'altitude (généralement entre 1 et 7%).

Séché à l'air, le matériau s'effondre, sa couleur s'assombrit. Il devient pulvérulent, de toucher limoneux à limono-sableux et ses caractéristiques physiques et mécaniques sont profondément modifiées du fait du changement de structure des gels.

L'ensemble de ces caractéristiques ont des conséquences essentielles sur la mise en culture et la préservation du milieu.

En profondeur et en fonction de l'épaisseur de cendres fines altérées, on passe localement à un horizon C constitué soit d'alternances de lits cendreux peu altérés, indurés (tuf), soit d'un mélange de

cendres en voie d'altération et de blocs décimétriques de basalte issus de coulées massives sous-jacentes. Cet horizon, présent généralement au delà de 100 cm, n'est exploité que par les racines des ligneux.

3.3.3. Caractéristiques chimiques

Les andosols réunionnais sont faiblement acides (pHeau proche de 5.0). La Capacité d'Echange Cationique est peu élevée (6 à 20 meq/100g) liée essentiellement à la matière organique, on notera une Capacité d'Echange Anionique importante (de l'ordre de 30 meq/100g) due à la présence de produits amorphes à base d'alumine. Cette CEA serait responsable de la rétention énergétique du phosphore, présent en grande quantité (1 500 à 3 000 ppm de phosphore total) mais peu disponible pour les plantes.

3.4. Minéralogie et propriétés associées

Les propriétés physiques macroscopiques originales des sols andiques, abordées dans le chapitre suivant, apparaissent directement en relation avec la nature et l'organisation intime de leurs constituants. Il convient d'en rappeler les spécificités.

3.4.1. Constitution des andosols : généralités

□ Les composés paracristallins

La matrice du matériau andique est principalement constituée de minéraux secondaires amorphes (absence de raie de diffraction aux rayons X) ou plutôt "cristallisés à courte distance" (HERBILLON, 1983), regroupés sous le terme générique d'allophanes. Ces allophanes sont issus de l'altération des verres volcaniques, accompagnée d'un lessivage des éléments basiques (K, Na, Mg, Ca) et d'une partie de la silice.

On distingue :

- l'allophane *sensu-stricto*, constituée de sphères creuses de 3.5 à 5.5 nm de diamètre, associées en amas globuleux de plusieurs dizaines de nanomètres. Les sphères élémentaires sont formées d'un seul feuillet 1/1 de type kaolinite, avec la couche octaédrique tournée vers l'extérieur, et une couche tétraédrique incomplète à l'intérieur (WADA, WADA, 1977). La composition de cet élément peut varier, de rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ voisin de 2 (comme la kaolinite) à 1 (proche de l'imogolite) ou moins (allophane-like, qui sont plutôt des constituants organo-minéraux).

- l'imogolite, minéralogiquement mieux définie, constituée de tubes élémentaires de 1 à 2.5 nm de section et une longueur de plusieurs microns. Ces fibres se regroupent en faisceaux enchevêtrés. La structure comprend des tétraèdres tournés vers l'intérieur du tube et une couche gibbsitique à l'extérieur : le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est égal à 1 (CRADWICK et al., 1972).

- d'autres constituants de petite taille (en général sous forme de sphères de 2 à 10 nm) qui sont des hydroxydes d'aluminium (gibbsite, de cristallinité décroissante avec l'altitude), des hydroxydes de fer (ferrihydrite, goethite), des gels silico-ferriques (hisingérite), et de l'opale. Ces composés Al-Si-Fe apparaissent prépondérants dans la genèse des autres constituants et pour certaines propriétés de fixation ionique (EGGLETON, 1987). Il y a co-stabilisation avec la matière organique évoluée et abondante (ac. humiques et fulviques). BOUDOT (1990) montre que Al amorphe protège efficacement les molécules

organiques contre les enzymes des bactéries du sol, par cofloculation en associations organo-minérales ou par adsorption.

☐ Les phyllosilicates

Dans les andosols plus anciens ou soumis à un climat plus sec une partie de l'année, les phyllosilicates de la famille des kaolinites sont représentés, très majoritairement par l'halloysite (argile 1/1 hydratée à 1 nm). Les travaux de DENAIX (1989) ont confirmé la formation d'un type d'halloysite glomérulaire (andosols jeunes, d'altitude) avant un type tubulaire.

La néogénèse d'halloysite s'accompagne toujours d'une diminution des teneurs en allophanes *lato-sensu*, même si la filiation [verre \Rightarrow allophanes \Rightarrow halloysite hydratée] est aujourd'hui révisée avec la mise en évidence de "précurseurs d'argile" formés directement à partir des verres (DENAIX, 1989).

A des altitudes plus basses, des argiles 2/1 (smectites) peuvent apparaître, pures ou interstratifiées avec l'halloysite (DELVAUX, 1988). VAKSMAN (1987) signale leur présence dans des andosols d'altitude à climat très humide, à la faveur d'une ambiance d'altération confinée et d'un faible drainage.

3.4.2. Minéralogie des séquences de la Réunion

☐ La matrice fine

GENSE (1976) a défini la succession altitudinale des principaux produits de l'altération sur les versants ouest et sud à couverture cendreuse de l'île :

- Gibbsite de faible cristallinité, imogolite et allophanes *l-s.* coexistent en altitude (au dessus de 800m).
- L'halloysite se substitue progressivement aux minéraux para-cristallins à des altitudes plus faibles, accompagnée de gibbsite mieux cristallisée.

* On rencontre de l'halloysite déshydratée au-dessous de 600 m, de la kaolinite à 400 m dans l'ouest. Elles se développent soit par perte d'eau de l'halloysite existante, au moins dans les horizons superficiels (SIEFFERMANN, 1969), soit directement, en fonction du moindre degré d'hydratation du milieu d'altération (GENSE, 1976).

☐ Les fractions grossières

Elles sont constituées de quelques résidus de verres ou de pyroclastites en voie d'altération, de quelques minéraux primaires relictuels (feldspaths, olivine, magnétite, ilménite, cristobalite) ou néoformés (gibbsite, hématite).

Figure I.3. Pourcentage d'amorphes en fonction de l'altitude sur les séquences étudiées
(Détermination à partir de l'alumine amorphe extraite à l'oxalate d'ammonium, horizon Sa ou B)

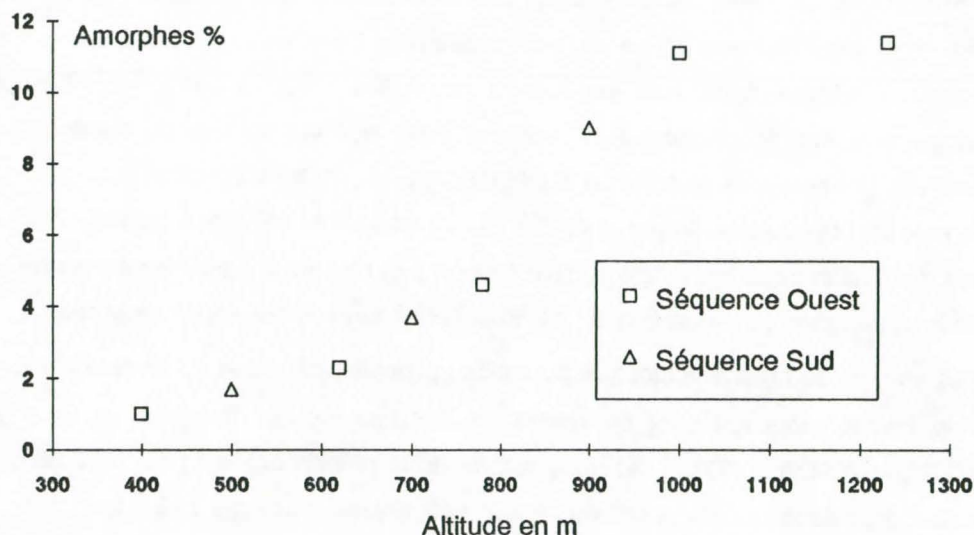


Figure I.4. Composition minéralogique des séquences de sols étudiées
(horizon Sa des andosols, B des sols brunifiés) :

Minéraux : Altitude (m) :	Séquence ouest :					Séquence sud :		
	380	620	780	1000	1230	500	700	900
Gibbsite	*	**	**	**	**	**	**	**
Halloysite - Métahalloysite	*	**	**	*	0	*	*	*
Amorphes	*	*	*	**	**	*	**	**
Imogolite	?	*	?	**	**	*		
Kaolinite	**			*	0			
Magnétite - Maghémite		*	*	*	*			*
Ilménite	*	*	*	*	*			
Ferrihydrite		*						
Hématite	*		*	*		*	*	*
Goethite alumineuse		*		*		*	*	*
Smectites	*			?				
Opale						*		
Amphibole						*		
Cristobalite						*		
Lépidocrocite - Bohémite	?							

0 : absence / ? : incertitude / * : présence / ** : abondance.

Ces résultats constituent une synthèse des données analytiques obtenues par le Laboratoire de Science du Sol de l'INRA Versailles sur nos échantillons (Localisation et description des séquences : chapitre 4.2.), ainsi que des résultats des travaux de ZEBROWSKI (1975), ROSELLO (1984) et DENAIX (1989) sur des séquences similaires.

3.4.3. Surface spécifique et masse volumique du solide

Dans le matériau allophanique, les valeurs de surface spécifique sont élevées, de l'ordre de 300 à 600 m².g⁻¹ (MAEDA et al., 1977). QUANTIN (1972) cite des valeurs de 150 m².g⁻¹ pour des sols peu évolués, de 750 m².g⁻¹ pour des sols riches en hydroxydes Al et Fe et en imogolite. Elles sont équivalentes à celles de minéraux phylliteux à porosité interfoliaire (smectites : 600 à 800 m².g⁻¹). Compte tenu de la structure minéralogique des allophanes, il est vraisemblable que les valeurs de surface spécifique totale soient plus élevées (mesure par absorption d'éthylène-glycol ; AOMINE, OTSUKA, 1968). PATERSON (1976) indique en effet la présence de pores de dimension très faible (diamètre inférieur à 1 nm) associés à une porosité de dimension supérieure (2 à 10 nm) (absorption d'azote à basse température). Cette porosité fine d'accès difficile, suggère une sous-évaluation de la surface spécifique totale mesurée.

Les valeurs de masse volumique du solide γ_s (poids spécifique ou densité réelle) obtenues par déplacement de liquide mouillant sont de l'ordre de 2.7 g.cm⁻³ pour l'imogolite et de 2.75 g.cm⁻³ pour l'allophane (WADA et WADA, 1977). Celle du quartz et de la plupart des sols est de 2.65 g.cm⁻³. Les taux élevés de matière organique occasionnent des poids spécifiques moindres (2.3 g.cm⁻³ pour 25% de M.O.; BONFILS et MOINEREAU, 1971). De LEENHEER (cité par BONNEAU et LEVY, 1979) propose une correction soustractive lorsque le taux de M.O est supérieur à 3%. : $\gamma_s = 2.65 - (0.02 * \text{M.O.}\%)$.

Des mesures effectuées au pycnomètre à gaz confirment l'incidence de la M.O. du sol (BIELDERS et al., 1990). STENGEL (1979) évalue expérimentalement la masse volumique de solide de la matière organique à 1.43, en supposant sa teneur en carbone égale à 50% (loi des mélanges). γ_s varie alors en fonction de la teneur en carbone selon une hyperbole très tendue, peu différente d'une droite de pente moyenne égale à -0.0048.

Par ailleurs, WESLEY (1973) montre que le séchage à l'air ne modifie pas les valeurs de γ_s mesurées sur sols à halloysite, en revanche ce traitement préalable diminue sensiblement ces valeurs sur sols à allophanes (-0.02 à -0.05 g.cm⁻³).

Figure I.5. Masse volumique du solide pour les matériaux des séquences étudiées (méthode : pycnomètre à eau)

Altitude et type d'horizon	Masse volumique du solide (g.cm ⁻³)
380m B	2.81
620m A	2.89
620m B	2.89
780m Sa	2.82
1000m Aa	2.46
1000m Aa brûlé	3.13
1000m Sa	2.69
1230m Sa	2.27
500m B	3.02
700m Sa	2.52
900m Sa	2.61

Les résultats obtenus par le Laboratoire de Gestion Physique des Sols du CIRAD-ENSA Montpellier sur les sols de nos séquences, sont conformes à ces observations : en comparant les données obtenues à 1 000 m sur l'horizon superficiel humifère (2.46 g.cm⁻³) et sur l'horizon d'altération (2.69 g.cm⁻³), puis sur l'horizon superficiel humifère calciné (3.13 g.cm⁻³), on constate l'influence très nette de la matière organique. L'horizon d'altération de l'andosol perhydraté d'altitude (1230m) est très riche en M.O. évoluée et

présente un poids spécifique de 2.27 g.cm^{-3} . Au plan expérimental, ces variations posent le problème de la validité de la méthode par déplacement de liquide. L'évaluation correcte de la masse volumique du solide est indispensable pour l'expression volumique des résultats expérimentaux (indice des vides, indice d'eau).

3.4.4. Micro-organisation et granulométrie minérale

ROSELLO (1984) a pu mettre en évidence une micro-organisation hiérarchisée dans les andosols de la Réunion. Des nanoagrégats élémentaires (0.1 à $1 \mu\text{m}$) sont constitués de sphérules d'allophanes, de filaments d'imogolite, d'halloysite, d'oxydes et hydroxydes de Fe-Al et de matière organique (modèle de HETIER, 1975). Ces nanoagrégats sont regroupés en polyagrégats successifs, jusqu'à des microagrégats de 0.1 à 1 mm . DENAIX (1989) montrent que ces structures emboîtées, révélées lors de la dessiccation, ne sont pas présentes dans le sol humide où l'agrégation est faible. Seuls des nanoagrégats sont nettement observés, quantitativement peu importants par rapport aux minéraux libres de la matrice, mais sites privilégiés de la néoformation de minéraux tels que l'halloysite. Des microagrégats d'origine biologique semblent également présents.

En conditions naturelles, l'agrégation est un processus marginal. Lorsque le matériau est soumis à des potentiels élevés (séchage à l'air), des macro-agrégats stables apparaissent après mobilisation des amorphes (KUBOTA, 1973; GRANJEAN, 1983) et de l'halloysite (VAN OORT, DOREL, 1988). Ces processus, très importants pour la différenciation des horizons superficiels et la modification des propriétés physiques macroscopiques, seront abordés dans la seconde partie.

4. Sols et sites d'étude

4.1. Critères de choix

Les sols sur lesquels nous avons travaillé sont exclusivement des sols agricoles. Les sols andiques sur cendres du Piton des Neiges (50 000 à 30 000 ans) des versants ouest et sud ont été choisis.

- ils couvrent une surface mise en culture importante, où les enjeux agricoles et socio-économiques sont considérables⁽⁴⁾
- ils concernent des spéculations variées (canne à sucre, géranium, cultures maraîchères, vivrières, fruitières, prairies)
- les sols s'étagent nettement en fonction de l'altitude, des bruns ou ferralitiques andiques aux andosols ; ces sols sont typiques, bien différenciés
- le CIRAD dispose sur ces secteurs de stations expérimentales, de terrains de recherche, de suivis en milieu paysan, et donc de références agronomiques indispensables.
- des études thématiques sur des séquences pédogénétiques complètes ou des profils particuliers ont été réalisées sur ces versants (ZEBROWSKI, 1975; ROSELLO, 1984; VAKSMANN, 1987; DENAIX, 1989), s'étalant de sites agricoles à des climax pédologiques sous végétation naturelle; les résultats obtenus en

(4) Les "Hauts" sont officiellement délimités par le décret n°78-690 du 23 juin 1978 et constituent une zone spéciale d'action rurale comprenant les zones au-dessus de 600 m dans l'ouest et le sud-ouest, 400 m dans le nord, l'est et le sud, 200 m dans le sud-est; l'ensemble des Cirques : soit le domaine d'extension des sols andiques à la Réunion.

matière de minéralogie, microstructure, physico-chimie et hydrodynamique assurent un cadre pédologique et scientifique intéressant pour une étude comme celle-ci.

4.2. Séquences de sols et stations de recherche

4.2.1. L'ouest

Une séquence ouest est définie : l'ensemble des sols est développés sur les cendres épanchées lors des phénomènes explosifs marquant la fin de l'activité du Piton des Neiges (pyroclastites indifférenciées ou trachytiques, -40 000 à -15 000 ans). Ces cendres ont recouvert les coulées basaltiques et andésitiques de la phase IV de l'activité effusive du Piton des Neiges (-230 000 à -70 000 ans). Le sol le plus bas dans la séquence (380 m) s'est développé directement sur ces coulées.

- 1 230 m, Bras Calebasse, andosol chromique désaturé perhydraté sur cendres, sous prairie. Ce matériau constitue la borne altitudinale supérieure de l'étude.
- 1 000 m, Cocâtre, andosol chromique désaturé sur cendres, sous rotations vivrières et géranium.
- 780 m, les Colimaçons, andosol chromique saturé sur cendres, sous rotations vivrières et géranium.
- 620 m, la Saline, brunisol andique saturé sur cendres, sous canne.
- 380 m, Villèle, brunisol saturé épais sur coulées aa (mugéarites en gratons) et autobréchifiées, sous canne. Ce dernier sol permettra de comparer les comportements andiques avec ceux d'un sol tropical argileux.

Dans cette zone, le CIRAD dispose de 2 stations de recherche : les Colimaçons (780 m, géranium, systèmes vivriers, arboriculture fruitière) et Petite-France (1 300 m, systèmes fourragers, géranium, fruitiers), et gère divers sites expérimentaux : Cocâtre (850 à 1 050 m), Fond Jardin (975 à 1050 m) sur lesquels des essais thématiques lourds seront envisagés (relations sol-machine, sol-plante). Un réseau de suivis en milieu paysan apporte des résultats essentiellement agronomiques (tests variétaux, fumure, itinéraires...) sur les systèmes de culture à base de géranium.

4.2.2. Le sud

Sur le même type de matériau cendreux originel (pyroclastites), une séquence de sol a été choisie dans le sud, afin de comparer les comportements de ces sols à ceux de l'ouest, de vérifier les possibilités d'extrapolation de nos résultats, et d'observer le décalage altitudinal des faciès, résultant des différences climatiques (exposition, pluviosité). Les coulées recouvertes par le manteau cendreux sont des basaltes de la phase 3 de l'activité du Piton de la Fournaise (< 350 000 ans).

Trois profils sont exploités :

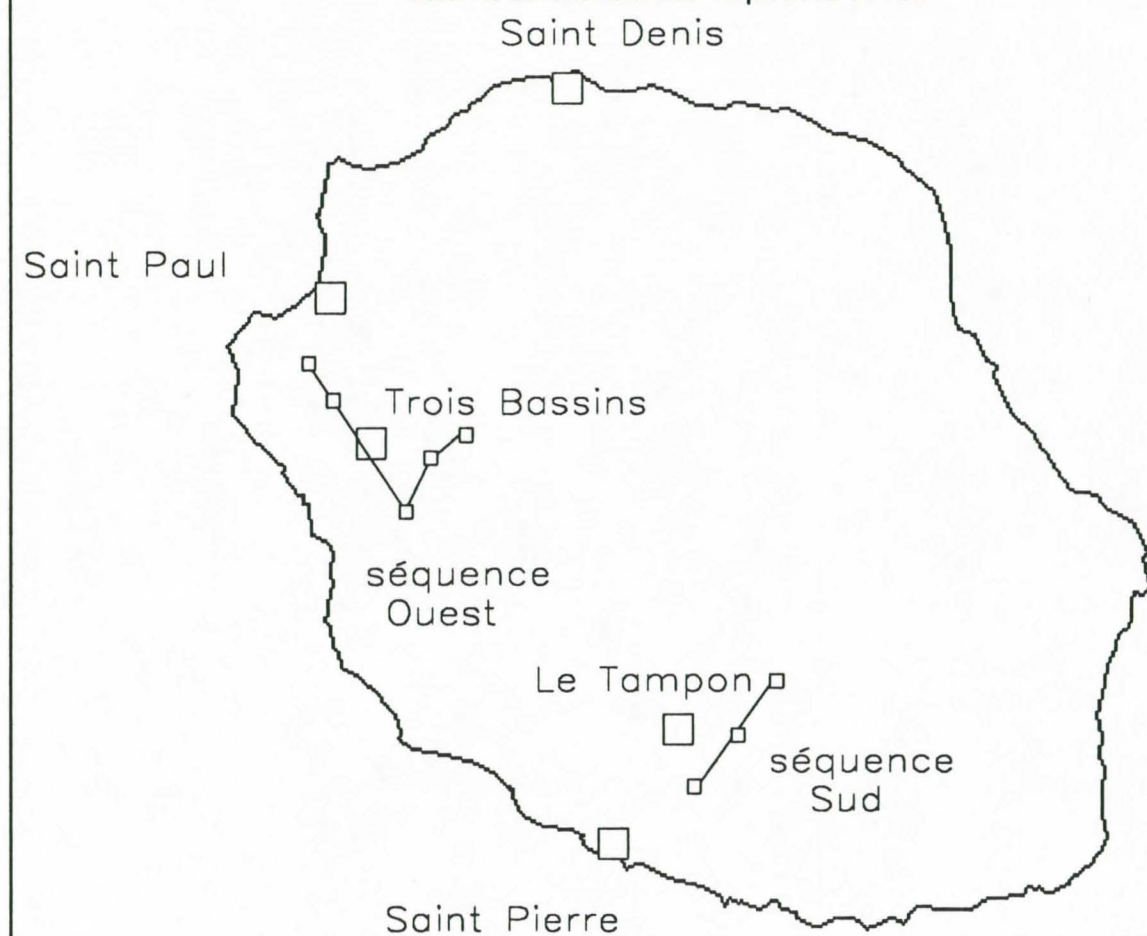
- 900 m, Bras Creux, andosol chromique désaturé perhydraté, sous canne
- 700 m, le Tampon, andosol chromique saturé, sous canne
- 500 m, Bérive, brunisol andique saturé (légèrement ferrugineux), sous canne.

Ces profils sont grossièrement localisés sur les cartes 4 et 6. Données analytiques et description de profils figurent en annexes.

Figure I.6. Caractéristiques des séquences étudiées.

Type de sol : R.P.F.(90)	U.S.D.A. (1975) (sous-ordre)	Localisation	Altitude	Profil	Echantillons
Brunisol	Tropept	Villèle	380 m	O ₁	O ₁ A / O ₁ B
Brunisol andique	Tropept	La Saline	620 m	O ₂	O ₂ A / O ₂ B
Andosol saturé	Eutrandept	Collimaçons	780 m	O ₃	O ₃ Aa / O ₃ Sa
Andosol désaturé	Dystrandept	Cocâtre	1 000 m	O ₄	O ₄ Aa / O ₄ Sa
Andosol perhydraté	Hydrandept	Calebasse	1 230 m	O ₅	O ₅ Aa / O ₅ Sa
Brunisol andique	Tropept	Bérive	500 m	S ₁	S ₁ A / S ₁ B
Andosol saturé	Eutrandept	Le Tampon	700 m	S ₂	S ₂ Aa / S ₂ Sa
Andosol désaturé	Dystrandept	Bras Creux	900 m	S ₃	S ₃ Aa / S ₃ Sa

Carte 6. Localisation des séquences de sol.



**Deuxième partie : Etude analytique des
caractéristiques physiques : Etat hydrique et
évolution des matériaux**

I. Introduction

Paradoxalement, c'est dans le domaine physique que le terme de fertilité est le plus contesté, alors que cette composante apparaît déterminante puisque le sol est à la fois le support des cultures et des interventions culturales (BOIFFIN et MONNIER, 1982). S'il est vrai que les composantes physiques de la fertilité sont des conditions et non des facteurs directs du rendements (SEBILLOTTE, 1990), elles interagissent cependant étroitement avec :

- les stades initiaux de mise en place des capteurs aériens (l'état structural détermine en partie germination et levée des cultures),
- le développement et le fonctionnement des systèmes racinaires,
- la protection du milieu (les propriétés de transferts et les caractéristiques superficielles déterminent en partie l'érodibilité des sols),
- la réalisation des opérations culturales.

Ce rôle du sol est évolutif. L'état et le fonctionnement physique du sol ne sont pas seulement hérités de la pédogénèse mais interactifs avec des facteurs externes, naturels ou anthropiques, générateurs de contraintes. Il appelle en outre à formuler des jugements et donc à rechercher des critères de description. Ceux ci sont essentiellement de deux ordres :

- la répartition des phases du sol, avec comme indicateurs : teneurs en eau, porosités, leurs évolutions sous contraintes ...
- l'organisation et le comportement de la phase solide, avec comme indicateurs : texture, structure, stabilité, leurs évolutions sous contraintes ...

Les sols, et plus particulièrement les horizons superficiels, sont soumis à différents types de contraintes. Les unes s'exercent sur l'eau, par les variations des conditions bioclimatiques. Les autres sont appliquées à la composante solide, il s'agit de contraintes mécaniques au sens large.

Dans le matériau andique, la fraction la plus fine n'est pas de nature argileuse au sens minéralogique. C'est la fraction "amorphe", d'activité interfaciale élevée, qui détermine les potentialités de rétention et de circulation de l'eau, l'évolution des systèmes de porosité sous l'effet de contraintes hydriques et mécaniques. Il s'agit d'évaluer l'incidence de l'état hydrique des horizons culturaux (affleurants naturellement ou par décapage sus-jacent, érosion, remaniement ou mélange) et des horizons sous-jacents, sur leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Il faut cerner le problème des relations eau - matériau andique en prenant en compte les contraintes mises en jeu dans les matériaux (répartition et interactions entre phases, aspects énergétiques, modifications de l'organisation du système).

Cela constitue l'objectif de ce chapitre : après l'exposé des rappels théoriques sur lesquels s'appuie la démarche expérimentale développée, les méthodologies utilisées sont explicitées.

En relation avec les variations de potentiel hydrique, nous étudierons d'abord l'organisation de la phase solide et son évolution, puis les propriétés de rétention de l'eau ainsi que les systèmes de porosité.

L'évolution de la répartition des phases du sol est ensuite envisagée sous contraintes mécaniques : le matériau est étudié au plan de son comportement mécanique.

II. Le sol : système dispersé à trois phases

1. Généralités

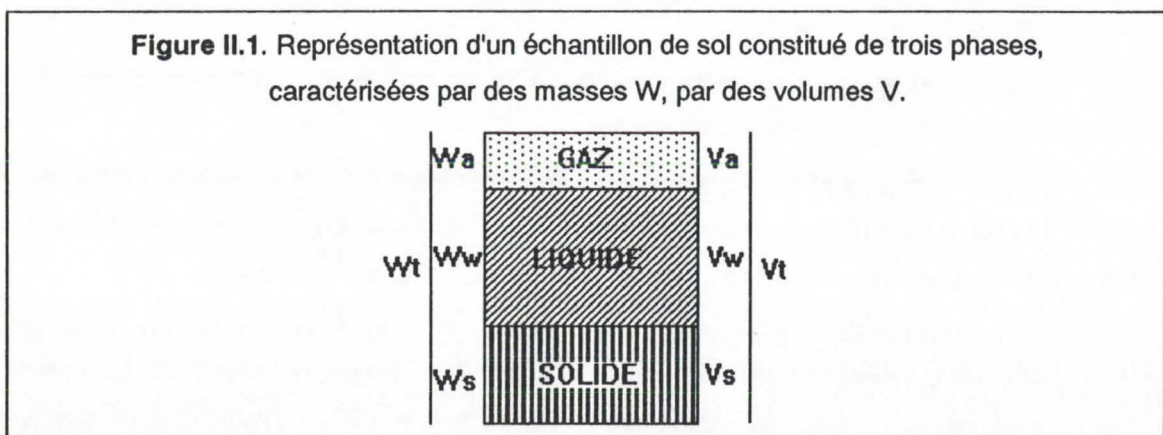
Le sol est un milieu hétérogène, à plusieurs phases, finement divisé, dispersé et poreux (HILLEL, 1975). Trois phases naturelles y sont représentées :

- la phase solide, par les particules minérales et organiques,
- la phase liquide, par l'eau du sol contenant des substances dissoutes,
- la phase gazeuse, par l'air du sol.

Ces phases interagissent et sont intimement liées; dans le cas des andosols, nous avons vu que la surface interfaciale par unité de poids est importante. La nature dispersée du sol et sa grande activité spécifique conditionnent les phénomènes de rétention d'eau, de retrait / gonflement, de dispersion, d'agrégation, d'adhésion, d'adsorption, d'échange ionique...

Les mouvements des phases fluides dans le sol sont régies par des forces que nous définirons plus loin.

Afin de pouvoir exprimer quantitativement les proportions de ces phases et pour une représentation claire, elles sont considérées schématiquement comme indépendantes et superposées (Figure II.1.).



2. Relations entre volumes et masses des phases du sol

2.1. Notations

Les notations sont celles habituellement utilisées en mécanique des sols (COSTET, SANGLERAT, 1981; TESSIER, 1984). Tout matériau est donc constitué d'une phase solide représentée par des unités diverses (particules minérales ou organiques, agrégats élémentaires...) dont l'assemblage délimite un espace qui est partiellement occupé par les fluides (solution et air du sol). Deux modes de

description sont possibles pour un échantillon de sol : une description massique et une description volumique.

Les symboles suivants sont utilisés pour décrire les trois phases :

V : volume

W : masse

γ : masse volumique

Les indices a, w et s indiquent que les notations concernent respectivement l'air, l'eau et le solide. L'indice t indique que le paramètre se rapporte à toutes les phases (échantillon complet), l'indice v indique que le paramètre se rapporte au vide ménagé entre les particules solides (porosité).

2.2. Relations de base : approches pondérale et volumique

Des relations de base sont établies à partir de ce modèle triphasé :

Ainsi, le volume total peut s'écrire : $V_t = V_a + V_w + V_s$

la masse totale peut s'écrire : $W_t = W_a + W_w + W_s$

raisonnablement, on admet : $W_t = W_w + W_s$ (W_a est négligeable),

on peut définir le volume des vides : $V_v = V_a + V_w$

A partir de ces données, on peut définir d'autres paramètres :

la masse volumique apparente sèche: $\gamma_d = W_s / V_t$ (ou couramment : densité apparente sèche, *dry bulk density*),

la masse volumique du solide: $\gamma_s = W_s / V_s$ (ou couramment : poids spécifique, densité réelle, *particle density*),

l'indice des vides (*void ratio*): $e = V_v = V_v / V_s$

l'indice d'eau (*water ratio*) : $\vartheta = V_w = V_w / V_s$

n étant la porosité : $n = V_v / V_t$

Et enfin deux expressions de l'humidité du sol :

La teneur en eau pondérale : $W = W_w / W_s$

La teneur en eau volumique : $\theta = V_w / V_t$

(pour l'eau du sol, on admet : $\gamma_w = W_w / V_w = 1$)

Citons quelques relations utiles, déduites des précédentes :

$$W = \theta / \gamma_d$$

$$\theta = \vartheta / (e+1)$$

$$\gamma_s = \vartheta / W$$

$$e = (\gamma_s / \gamma_d) - 1$$

2.3. Intérêt d'un système de référence volumique

Pour étudier les comportements physiques de sols différents, l'approche pondérale ne permet pas de comparer les matériaux entre eux ; dans le cas de nos sols andiques, les compositions minéralogiques et organiques occasionnent des masses volumiques de la phase solide (poids spécifiques γ_s) différentes et la masse volumique apparente (γ_d) de chacun d'eux est susceptible de varier en fonction de leur teneur en eau.

Même s'il est très difficile d'atteindre un état anhydre parfait, et si la maîtrise expérimentale du volume des échantillons traités est délicate, la référence au volume du solide V_s apparaît la meilleure pour comparer porosités et teneurs en eau (TESSIER, 1980).

Ainsi, l'indice d'eau ($\theta = V_w / V_s$) et l'indice des vides ($e = V_v / V_s$) font référence à une seule phase du système (V_s , invariant quelles que soient les contraintes) et sont additives, contrairement aux valeurs de teneur en eau volumique θ obtenues à différents niveaux de potentiel de l'eau.

2.4. Méthodes de mesure de la répartition des phases du sol

2.4.1. Méthodes gravimétriques

Universelles, elles font appel à la mesure de la perte de poids d'un sol frais jusqu'à un état anhydre de référence (séchage à 105 °C) et permettent d'obtenir la teneur en eau pondérale W . Si l'on connaît le volume des échantillons (V_v), on peut déterminer γ_d et θ (utilisation de cylindres pour prélèvement). La mesure de γ_s (pycnométrie sur les grains dans l'eau) permet de calculer la répartition volumique des différentes phases (e et θ).

En laboratoire, des manipulations ont porté sur du sol remanié (vrac) et sur des mottes.

2.4.2. Méthodes radiatives

L'emploi d'une sonde gamma-neutronique a permis la mesure au champ de γ_d et θ .

Rappelons que des neutrons "rapides" (5 meV) sont émis par une source d'Américium²⁴¹ / Béryllium⁹⁰. Ils sont ralentis par chocs successifs avec les noyaux constitutifs de la matière, le ralentissement le plus efficace est occasionné par des molécules d'hydrogène, essentiellement présentes dans l'eau du sol. Le neutron diffuse quand son énergie devient thermique (0.025 meV). Le comptage de neutrons "lents" (thermiques) par un détecteur à He³ est proportionnel à la teneur en eau volumique du matériau.

L'émission de photons provient d'une source de Césium¹³⁷. Ces photons perdent une partie de leur énergie en percutant le noyau des atomes constitutifs du matériau traversé. Plus celui-ci sera dense, moins il y aura de photons "intacts" atteignant le détecteur Geiger-Muller. Le comptage gamma sera d'autant plus faible que la masse volumique humide du matériau sera élevée. La relation n'est pas linéaire.

Emissions et comptages sont effectuées par un même appareil ; les valeurs de γ_d et θ sont calculées en exploitant un étalonnage préalable comparant comptages et valeurs obtenues par mesures gravimétriques (cylindres).

Description, fonctionnement et précision du matériel utilisé, conditions et validité de l'étalonnage ont été exposés par DUCREUX et al. (1989).

3. Réflexions préalables à l'étude expérimentale

Une compréhension des fonctionnements physiques, mécaniques et hydriques fondamentaux des matériaux est nécessaire pour appréhender leur potentialités macroscopiques : réactivité vis-à-vis de l'eau, du bioclimat, des contraintes associées à la mise en culture...

Une telle étude ne peut s'engager uniquement dans le milieu naturel ; il est nécessaire d'en extraire des échantillons pour obtenir des résultats en laboratoire. Un biais est donc introduit, même si un certain nombre de paramètres peuvent être validés par des mesures directes *in situ*.

La forte hétérogénéité du matériau andique observé à l'affleurement a été soulignée (VAKSMANN, 1987; RAUNET, 1991). Si l'hétérogénéité minéralogique est faible au sein d'une même unité, compte tenu de la nature du substrat cendreux originel, une variabilité importante apparaît dans la granulométrie, l'organisation structurale et la répartition des phases du matériau (héritées des différents faciès cendreux, des contraintes bioclimatiques ou géomorphologiques locales, de l'histoire culturelle).

Cette variabilité touche essentiellement le profil, dans sa partition verticale en horizons, et les faciès superficiels observés. Les variations latérales au sein d'un même horizon sont plus faibles. On peut même souligner la relative homogénéité du matériau massif Sa sous-jacent.

Les changements d'échelle de mesures et la mise en relation des données restent cependant contestables. Ils sont nécessaires, car des méthodes différentes sont utilisées, permettant de couvrir la gamme de variation des paramètres étudiés et de valider des résultats expérimentaux de laboratoire avec des données de terrain.

L'échantillonnage réalisé s'est appuyé sur les connaissances morphopédologiques disponibles (choix des profils et des horizons), l'objectif étant de constituer un référentiel de comportement des sols andiques et des andosols développés sur cendres. Toute extrapolation de ces résultats devra se faire cependant avec prudence, et en toute connaissance du contexte morphopédologique et bioclimatique.

De nombreuses répétitions ont été nécessaires pour obtenir les résultats. Ceux-ci sont généralement présentés sous forme de moyennes arithmétiques. Quelques manipulations de terrain ou de laboratoire n'ont pu être répétées (lourdeur de mise en oeuvre, destruction de sites expérimentaux, quantité de matériau nécessaire).

Le comportement hydrique des matériaux à texture fine (argiles, minéraux cristallisés à courte distance) dépend du degré de dessiccation préalable auquel a été soumis l'échantillon, cette dessiccation dépendant elle-même de la taille de l'échantillon. Il a donc été essentiel de mettre en oeuvre des protocoles de prélèvement puis de conservation des échantillons adaptés à ces contraintes.

III. : Etat hydrique et granulométrie des particules élémentaires

1. Position du problème

L'évolution des comportements physiques macroscopiques des matériaux andiques a pour origine des modifications intimes importantes du matériau en dessiccation (condensation et "cross-linking" des gels amorphes en particules stables, FURKERT et FIELDS 1968, cités par MAEDA et WARKENTIN, 1975; KUBOTA, 1972, TUNCER et al., 1977). Il apparaît donc essentiel d'étudier les processus d'évolution de la répartition dimensionnelle des particules élémentaires stables (de nature minérale ou structurale). Nous reviendrons plus loin sur les implications méthodologiques de cette recherche. De nombreuses études ont été effectuées sur la granulométrie dans les matériaux andiques, soulignant les problèmes méthodologiques posés par cette mesure.

Les principales observations suivantes ont été faites (QUANTIN, 1972 ; WESLEY, 1973 ; MAEDA et al., 1977) :

- difficulté d'obtenir une mise en suspension stable des produits colloïdaux (floculation des allophanes *s-l*, gels d'hydroxydes et argiles) : il s'agit là d'un problème méthodologique de dispersion chimique ;

- formation de structures grossières de dimension limoneuse et sableuse à partir des produits colloïdaux lorsque le matériau subit un séchage préalable : il s'agit d'un comportement particulier du matériau, il faut alors raisonner les choix analytiques au-delà du simple problème de dispersion mécanique ;

- pour ces deux raisons, de natures très différentes, obtention de résultats incompatibles avec l'appréciation tactile de la texture *in situ* (ZEBROWSKI, 1975) et avec les comportements physiques (affinité pour l'eau en particulier). L'intérêt prédictif de l'analyse granulométrique pour l'ensemble des comportements physiques et mécaniques, voire physico-chimiques (CEC) n'est donc pas établi.

2. L'analyse granulométrique sur andosol

Elle permet de connaître la répartition pondérale des particules élémentaires et nécessite la dissociation (dispersion, destruction des ciments organiques et minéraux) puis le fractionnement du matériau (par tamisage et sédimentométrie, norme AFNOR X 37-107, 1987). La sédimentométrie permet de quantifier les deux fractions les plus fines : limons fins (20 - 2 μm) et "argiles" (< 2 μm). L'obtention d'une suspension stable est nécessaire pour cela (méthode de la pipette de Robinson).

2.1. La floculation

Pour les matériaux andiques, la dispersion stable dans une solution des colloïdes minéraux (peptisation) est souvent difficile, pour plusieurs raisons : fortes liaisons organo-minérales, comportement électro-positif des complexes riches en hydroxydes et des allophanes, s'opposant aux argiles, composés humiques et à l'imogolite électro-négatifs. Ces interactions physico-chimiques confèrent au matériau en place une grande stabilité. En fonction des compositions des fractions fines et du pH des solutions de

suspension, il y a peptisation stable ou floculation (VAN OLPHEN, 1977 ; cité par CHAMAYOU et LEGROS, 1989). Ce problème peut être résolu de différentes façons, sans qu'une recette universelle puisse être proposée, de part sa nature complexe.

Certains éléments ont pu être avancés et permettent d'obtenir de bons résultats :

- l'utilisation d'hexamétaphosphate de sodium (calgon) comme dispersant est à proscrire (complexation hydroxydes de fer-phosphates, interactions allophanes-phosphates ?, COLMET-DAAGE et al., 1972), en règle générale, ne pas utiliser d'anions complexants. Le pyrophosphate pourra éventuellement être utilisé sur sol riches en halloysite ou allophaniques humifères,

- les sols nettement allophaniques de profondeur sont impérativement conservés frais, il n'y a pas floculation à des pH proches de 3 (utilisation de HCl 0.002 N ou 0.02 N, KUBOTA, 1972 ; COLMET-DAAGE et al., 1972 ; MAEDA et al., 1977),

- les sols jeunes ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 2$), les sols très riches en gibbsite, les sols riches en argiles, en composés humiques, à sesquioxydes, se dispersent en milieu alcalin (pH 9 - 10.5, COLMET-DAAGE et al., 1972 ; QUANTIN, 1972, 1987)

- on procédera préalablement au tamisage et à l'extraction des fractions grossières avant la mise en suspension (interactions entre particules magnétiques et oxydes-hydroxydes amorphes ?, COLMET-DAAGE et al., 1972). L'extraction au tamis des limons grossiers (20 - 50 μm) permet en outre de faire un bilan complet de l'analyse et il ne subsiste ainsi dans les suspensions pour sédimentométrie que les fractions fines.

WESLEY (1973) signale l'impossibilité totale d'éliminer la floculation dans des andosols perhydratés de haute altitude, purement allophaniques, si la dispersion préalable a été réalisée à l'aide d'hexamétaphosphate de sodium.

2.2. La dissociation des particules agrégées

Ces particules très stables limoneuse à sableuse apparaissent soit lorsque l'échantillon a été préalablement séché à l'air ou à l'étuve, soit lorsque l'échantillon est issu d'un horizon ayant subi naturellement des cycles de dessiccation (horizon superficiel Aa par exemple).

2.2.1. Agrégation lors du séchage manipulateur préalable

Les particules formées constituent un biais irrémédiable à l'analyse, et justifient l'acharnement expérimental mis en oeuvre pour les éliminer (agitation mécanique, sonification énergétique... BONFILS et DUPUIS, 1969). En outre, une analyse minéralogique des fractions fines peut nécessiter une dispersion totale de celles-ci (COLMET-DAAGE et al., 1972). Une comparaison entre les distributions granulométriques du sol frais et du sol séché peut constituer un "test d'andacité" du matériau (FORTIER et BROUWERS, 1987).

Pour une analyse standard, tout séchage préalable est à proscrire ; il convient dès le prélèvement d'en protéger l'échantillon.

2.2.2. Agrégation dans un horizon : le problème de caractérisation de la texture

La présence des particules est effective dans le sol en place, leur quantification analytique devient essentielle pour comprendre les propriétés physiques macroscopiques de ces matériaux, bien qu'elles ne constituent pas des entités élémentaires minéralogiques pures (individus cristallins). Leur dispersion radicale et aveugle devient une erreur expérimentale. Ce problème n'est pas exclusif aux sols andiques mais semble exister pour d'autres sols tropicaux dans lesquels la caractérisation de la texture pose problème (HENIN, 1976 ; DUCREUX, 1984 ; CHEVIGNARD, 1985). Ainsi, comme l'ont souligné CHAUVEL et MONNIER (1967), <<...si l'analyse granulométrique a pour but de caractériser la texture d'un sol, c'est-à-dire ce qui, dans son comportement physique, dépend de l'influence propre des particules de différentes tailles qui le constituent et des interactions qui se manifestent entre elles, on considère comme constituants granulométriques, toutes les particules, même complexes, dont la stabilité dans les conditions naturelles est suffisante pour que leur influence soit perceptible ...>>. C'est à l'évidence le cas des microagrégats stables issus de la condensation des gels amorphes (pseudo-sables de la littérature, HENIN, 1976; QUANTIN, 1987), qui sont directement responsables des fonctionnements physiques et hydriques macroscopiques et de l'appréciation tactile de la texture *in situ*.

2.3. Protocoles adoptés

En prenant en compte ces considérations, l'expérimentation et la mise en pratique de quelques règles issues de la bibliographie (importante mais parfois contradictoire) ont permis de mettre au point un protocole adapté pour l'analyse granulométrique des matériaux issus de nos séquences de sol, selon deux stratégies : destruction totale de la M.O. et des structures, ou détermination de la texture effective (prise en compte de la micro-agrégation stable). Trois répétitions sont effectuées par échantillon, les résultats sont présentés sous forme de moyenne arithmétique.

2.3.1. Préparation et prise d'essai

Les matériaux ont été conservés frais (humidité de prélèvement) et à l'obscurité (chambre froide 4 °C en cas de stockage prolongé). Ils sont préalablement tamisés à 5 mm. Aucun refus n'a été observé à cette maille pour les horizons profonds des sols formés à partir de cendres. Quelques agrégats excèdent cette taille dans les horizons superficiels et quelques graviers de basalte sont présents dans O1 (roche mère différente).

La prise d'essai pour l'analyse est de 20 g de sol frais. Une mesure de teneur en eau (W) du matériau est effectuée parallèlement.

2.3.2. Destruction de la matière organique

Cette opération n'est intervenue que dans quelques cas. La destruction de la matière organique se fait au peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée) d'abord à froid, H₂O₂ 30 volumes pendant par 24 h; puis H₂O₂ 110 volumes pendant encore 24 h. La fin de l'attaque se fait à chaud (vers 60 °C) avec H₂O₂ 110 volumes, pendant quelques heures (selon la persistance de l'effervescence). On maintient absolument le matériau immergé dans la solution d'attaque (pas de séchage). Le pouvoir oxydant de H₂O₂ croît avec

l'acidité, on ajoute quelques gouttes de HCl N à la solution d'attaque. Malgré son caractère drastique, l'oxydation à l'eau oxygénée ne provoque pas de dissolution des produits allophaniques (COLMET-DAAGE et al., 1972).

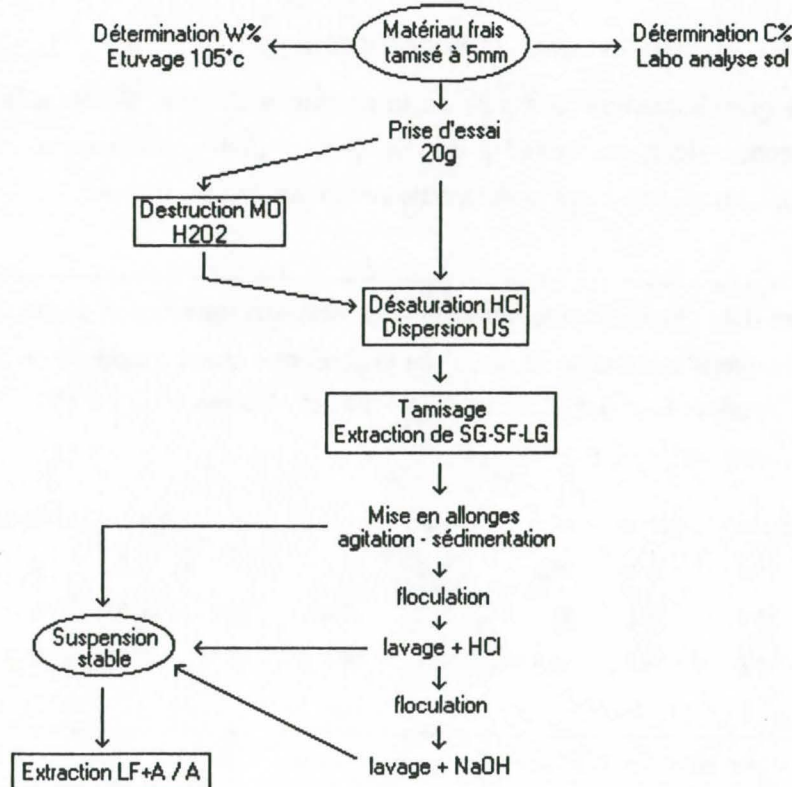
2.3.3. Désaturation et dispersion

Le matériau est mis en solution de HCl 0.02 N, après lavage à l'eau distillée en cas d'attaque préalable de la M.O. (facilité par le dépôt à chaud en fin d'attaque). Cette solution est soumise à une sonification énergétique (115 W, 20 kHz, 4 min.) de manière à briser les ciments les moins stables (gels d'hydroxydes et d'allophanes), et à nettoyer efficacement les particules grossières. La sonification en milieu acide semble en outre favoriser la mise en suspension stable.

2.3.4. Tamisage : extraction des sables et limons grossiers

La solution est passée sur une colonne de tamis de maille : 2 mm, 200 μ m, 50 μ m et 20 μ m, les refus soigneusement lavés étant constitués respectivement de graviers fins (G : 5 - 2 mm), de sables grossiers (SG : 2 - 0.2 mm), de sables fins (SF : 200 - 50 μ m) et de limons grossiers (LG : 50 - 20 μ m). Chaque fraction est extraite, séchée à 105 °C et pesée. On notera que le tamisage à 20 μ m est délicat : il doit se faire sous vibrations (chocs légers et répétés sur le bord du tamis) pour permettre le passage de la solution dans les mailles, dont le rinçage doit être soigné.

Figure II.2. Protocole d'analyse granulométrique



2.3.5. Mise en suspension et sédimentométrie

La solution est mise en allonges à sédimentation et agitée mécaniquement quelques minutes (retournements successifs des allonges). Après mise au repos, s'il y a floculation, le surnageant est évacué, mis à séché à 105 °C, pesé. Le produit sera ajoutée à la fraction inférieure à 2 µm déterminée sur aliquote (évacuation d'hydroxydes de fer, aluminium, aluminosilicates amorphes...). Le floculat est remis dans une solution de HCl 0.02 N et agité. Si la floculation persiste (cas rarement observé : sols à halloysite, horizons andiques superficiels très humifères), le floculat est lavé à l'eau distillée (surnageant récupéré et pesé), puis mis en solution dans NaOH 0.02 N. Après agitation et mise au repos, la dispersion est obtenue et on ajoutera éventuellement quelques gouttes de NaOH N dans l'allonge pour augmenter légèrement le pH et parfaire la dispersion. Ce protocole a toujours permis l'obtention de suspensions dispersées et stables pour l'ensemble de nos sols.

Lorsque la dispersion est obtenue, un premier prélèvement d'aliquote (20 ml/litre de suspension) après agitation permet de quantifier l'ensemble des fractions restantes, inférieures à 20 µm (argile + limons fins), un second prélèvement au temps défini par la loi de Stockes (GEE et BAUDER, 1986) permet de quantifier la fraction argileuse inférieure à 2 µm.

On notera que la fraction colloïdale, de dimension inférieure à 2 µm est qualifiée d'argile, même lorsqu'elle n'est pas composée de phyllosilicates argileux vrais (allophane et imogolite, ou oxydes et hydroxydes de faible cristallinité).

2.4. Granulométrie des éléments minéraux : résultats et mises au point expérimentales

2.4.1. Types de sol et effets du séchage

L'analyse granulométrique des sols de la séquence ouest a été réalisée, sur les matériaux d'altération B ou Sa conservés à leur humidité de prélèvement (frais) ou soumis à un séchage préalable équivalent à pF6 (sec). Le protocole inclut la destruction de la matière organique.

Figure II.3 : Granulométrie des éléments minéraux (destruction de la M.O.)
dans les horizons d'altération (B et Sa) de la séquence ouest, incidence du séchage
Argiles : 0 - 2 µm / Limons 2 µm - 50 µm / Sables 50 µm - 2 mm

	O1frais	O1sec	O2frais	O2sec	O3frais	O3sec	O4frais	O4sec	O5frais	O5sec
Argiles %	51.3	51.6	78.8	71.5	72.6	54.7	76.1	11.7	65.1	12.3
Limons %	34.4	35.2	10.7	17.6	24.7	20.6	21.5	26.3	29.4	20.4
Sables %	14.3	13.2	10.5	10.9	02.7	24.7	02.4	62.0	05.5	67.3

Sur l'ensemble de la séquence, la fraction colloïdale domine largement (textures AA d'argile lourde, A argileuse pour le matériau O1; d'après la nomenclature du GEPPA, 1963).

L'incidence du séchage à l'air sur la distribution granulométrique dans les horizons d'altération est sensible à partir de 620 m (O2, sol brun andique). cela correspond au passage de sols à kaolinite à des sols à phyllites hydratées et à amorphes. Dans les andosols à allophanes et gibbsite d'altitude (O4-O5), le séchage à l'air modifie profondément la texture qui passe d'argile lourde (AA) à sable argileux (Sa) ou sable argilo-limoneux (Sal).

2.4.2. Efficacité de l'eau oxygénée

Dans le profil O4 (andosol, 1 000 m), 88% du carbone organique initialement présent dans l'horizon Sa frais (4.8%, dosé méthode Anne) est détruit par l'attaque à l'eau oxygénée, 50% sont détruit par une oxydation à l'hypochlorite de sodium 24°Cl. Dans l'horizon superficiel Aa, l'eau oxygénée détruit 80% du carbone (5.1%), l'hypochlorite en détruit 40%. Ce test souligne l'inefficacité de l'hypochlorite, parfois préconisé, et la destruction partielle du carbone par l'eau oxygénée, particulièrement en surface. COLMET-DAAGE et al.(1972) considèrent que l'attaque à l'eau oxygénée détruit entre 80 et 100% du carbone organique du sol. CHARVE (1972) a comparé les taux de matière organique obtenus par attaque à l'eau oxygénée et dosage du carbone total au bichromate de potassium / acide sulfurique à chaud (méthode Anne), sur des andosols du Massif Central. Il montre que l'eau oxygénée n'attaque que 40 à 60% de la matière organique totale dosée (C total * 1.72).

2.4.3. Effets de la destruction de la M.O. et du séchage

Sur deux matériaux O2B et O4Sa, on procède à l'analyse granulométrique avec ou sans destruction préalable de la matière organique, et avec ou sans séchage préalable.

Dans le matériau brun andique, la destruction préalable de la matière organique modifie peu la distribution granulométrique. Sur sol frais, un léger transfert s'opère entre sables et fraction argileuse, peut-être par un nettoyage accru lors de l'attaque. Sur le matériau préalablement séché, le protocole ultérieur ne modifie pratiquement pas les résultats.

Figure II.4 : Analyse granulométrique dans les horizons d'altération (B et Sa) des profils O2 et O4, incidence du séchage, de la destruction de la M.O. Argiles : 0 - 2 µm / Limons 2 µm - 50 µm / Sables 50 µm -2 mm								
	Avec M.O.		Sans M.O.		Avec M.O.		Sans M.O.	
	O2frais	O2sec	O2frais	O2sec	O4frais	O4sec	O4frais	O4sec
Argiles %	76.9	70.7	78.8	71.5	62.7	04.6	76.1	11.7
Limons %	11.0	17.7	10.7	17.6	32.4	20.9	21.5	26.3
Sables %	12.1	11.6	10.5	10.9	04.9	74.5	02.4	62.0

Dans le matériau andique, la destruction de la matière organique permet l'enrichissement de la fraction argileuse au détriment des deux fractions grossières, y compris sur sol préalablement séché qui reste malgré tout largement sableux.

Un échantillon du matériau O4 frais a subi une inversion de traitement : il a d'abord subi une destruction de M.O., puis a été séché avant analyse. Les résultats obtenus sont : A=9.2%, L=20.4%, S=70.4. Comparés aux données obtenues sur sol séché puis minéralisé, ces résultats montrent que la matière organique semble protéger les éléments minéraux contre une agrégation en particules sableuses lors du séchage. Sa destruction préalable accentue ce processus. Ce comportement souligne les interactions fortes entre la fraction organique évoluée et la fraction minérale colloïdale.

3. Etat hydrique et évolution des particules élémentaires stables

Afin d'étudier plus en détail les distributions granulométriques rendant compte au mieux de la texture active, responsable des comportements physiques du sol en place, et leur évolution sous contrainte hydrique, nous avons choisi d'utiliser le protocole d'analyse proposé (cf chap. 2.3.) sans attaque préalable de la M.O., cela pour plusieurs raisons :

- l'étude vise à décrire par des manipulations des phénomènes susceptibles d'être déterminants *in situ*,
- il existe des liaisons physico-chimiques fortes entre fraction organique et fraction minérale (protection) qui doivent jouer un rôle important dans l'initiation de l'agrégation dans le sol en place,
- les teneurs en M.O. entre brunisols et andosols, entre horizons superficiels et horizons profonds sont très différentes, comme les états structuraux et les processus d'agrégation observés *in situ*,
- la matière organique n'est que partiellement détruite par l'attaque à l'eau oxygénée.

L'ensemble du mode opératoire est maintenu, en particulier la sonification en milieu acide susceptible de nettoyer les particules de dimension sableuse et de n'en conserver que les plus stables. Elle favorise en outre la mise en suspension stable de la solution pour sédimentométrie.

Afin d'essayer de mieux rendre compte de l'évolution des distributions, les fractions grossières sableuses et limoneuses ont été sous-partitionnées lors des tamisages, les distributions sont donc obtenues en 9 classes réparties entre 0 et 5mm :

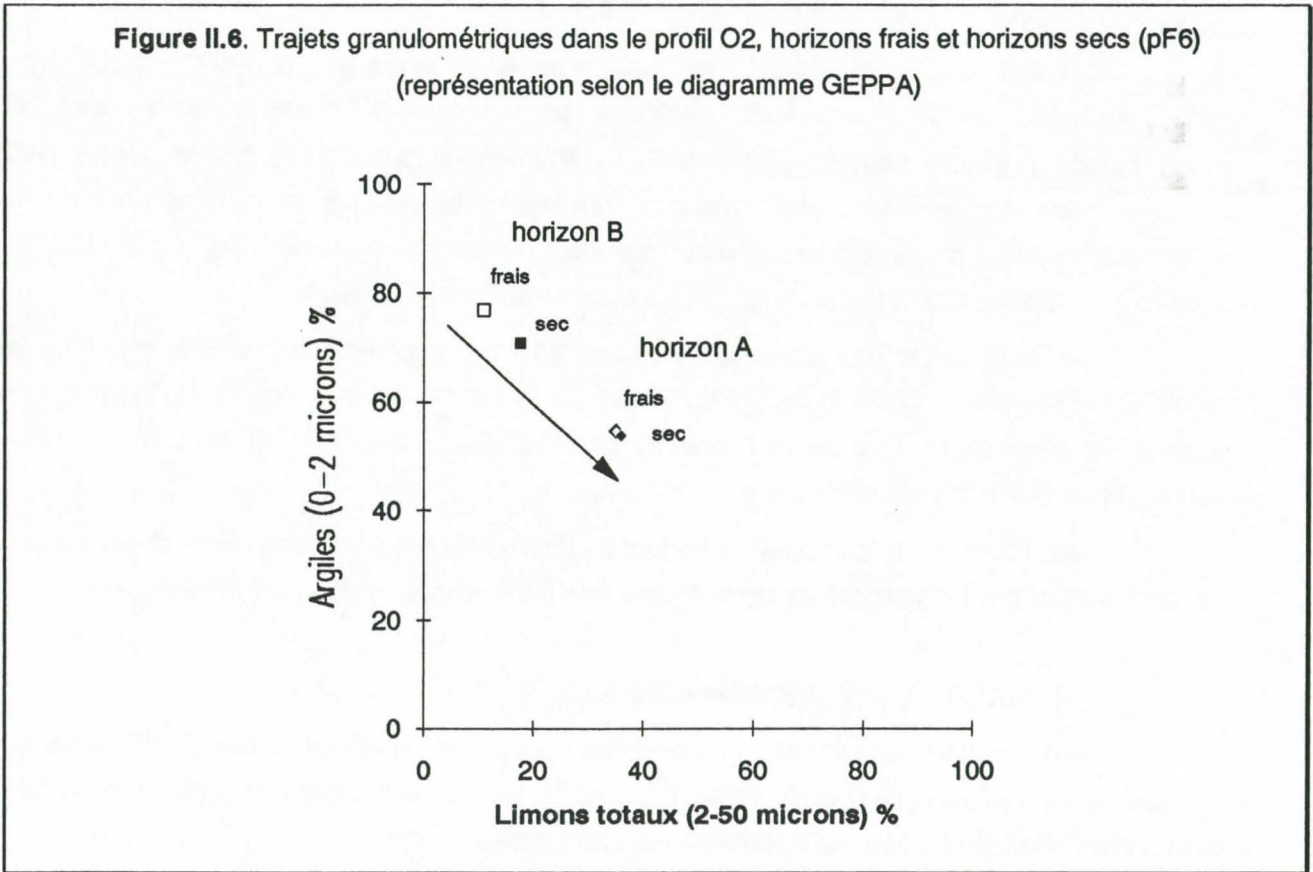
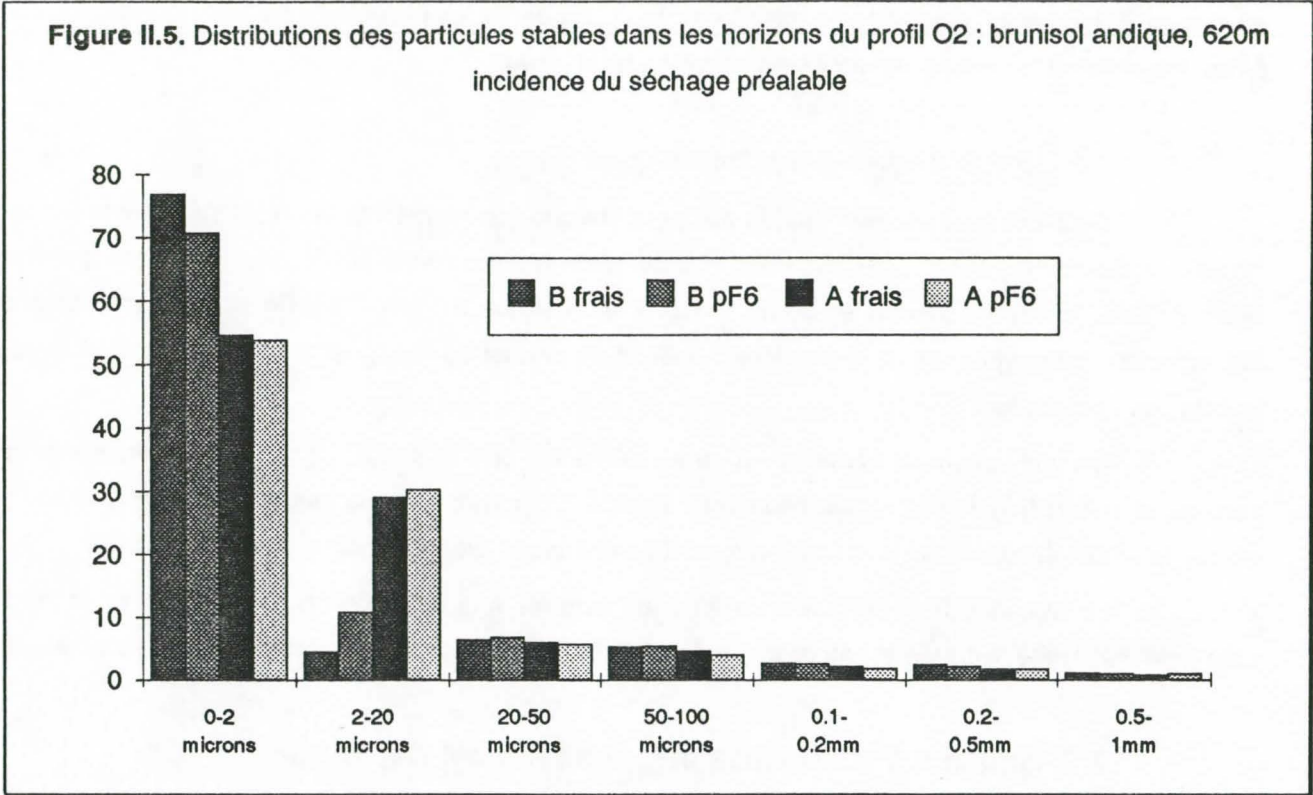
Eléments grossiers EG : 5 - 2 mm
Sables grossiers SG3 : 2 - 1 mm
Sables grossiers SG2 : 1 - 0.5 mm
Sables grossiers SG1 : 0.5 - 0.2 mm
Sables fins SF2 : 200 - 100 μ m
Sables fins SF1 : 100 - 50 μ m
Limons grossiers LG : 50 - 20 μ m
Limons fins LF : 20 - 2 μ m
Argiles A : 2 - 0 μ m.

3.1. Brunisol andique à halloysite, profil O2, 620 m

3.1.1. Distributions granulométriques

Les distributions granulométriques des particules stables sont largement dominées par les fractions fines (figure II.5). Pour les matériaux frais, on constate un transfert entre argiles et limons fins entre l'horizon B plus riche en colloïdes et l'horizon A, les fractions grossières étant identiques. La représentation

graphique des fractions se limite aux particules inférieures à 1 mm, les autres fractions étant très faiblement exprimées.



Pour les deux horizons considérés, A superficiel et B d'altération, le séchage provoque le même transfert : enrichissement de la fraction LF (2 - 20 μm) aux dépens des colloïdes. On note également une différence de taux en sables entre horizon B et horizon A. Ces derniers ayant subi les contraintes de mise en culture (tassements, écrasements, cisaillements...), les particules grossières ont certainement tendance à être fragmentée, la texture s'oriente vers un pôle plus limoneux.

3.1.2. Trajets granulométriques

Ce processus est bien mis en évidence lorsque l'on représente les résultats sous la forme de "trajets granulométriques" (LEGROS, 1982). L'échantillon est positionné sur le diagramme triangulaire du GEPPA (1981) selon ses teneurs en limons totaux X et en argiles Y (figure II.6.). Ce mode de représentation est réducteur (regroupement en 3 fractions A-L-S) mais permet de souligner les tendances évolutives de texture des matériaux.

On voit nettement l'évolution du matériau vers le pôle limoneux, de l'horizon d'altération vers la surface, et en fonction du séchage expérimental imposé. On constate que le matériau B séché n'atteint pas encore le matériau superficiel frais (celui-ci a subi de nombreux cycles humectation-dessiccation).

Le matériau halloysitique apparaît donc sensible à la dessiccation : une partie de la fraction colloïdale (halloysite hydratée et amorphes) est mobilisée sous forme de particules limoneuses stables.

3.2. Andosol à allophanes et gibbsite, profil O4, 1000m

3.2.1. Distributions granulométriques

La texture de l'horizon Sa frais est dominée par les colloïdes (texture très fine d'argile lourde : AA). On note la quasi absence de particules stables de taille supérieure à 100 μm . Après séchage (pF6), le matériau prend une texture moyenne sablo-argileuse (sable argilo-limoneux : SaI). L'horizon Aa superficiel frais a une texture équilibrée fine argilo-limoneuse (limon argilo-sableux : LAS), le séchage à l'air la modifie peu, le matériau passe à une texture moyenne limoneuse (limon sablo-argileux : LSa). On constate donc des écarts très importants à la fois entre types d'horizon et entre états hydriques.

Les distributions granulométriques (figure II.7.) montrent l'importance des transferts entre fractions. Dans l'horizon d'altération Sa, les fractions fines inférieures à 20 μm -argiles et limons fins- sont réduites après dessiccation, au profit de l'ensemble des fractions grossières, et en particulier les fractions comprises entre 100 et 500 μm (SF2-SG1).

Dans l'horizon Aa, les transferts se font principalement entre fractions fines : appauvrissement de la fraction colloïdale au profit des limons fins, dans une moindre mesure des fractions grossières.

3.2.2. Trajets granulométriques

La représentation des trajets granulométriques dans le triangle de texture GEPPA illustre ces tendances (figure II.8.) : lors de la dessiccation, l'horizon Sa s'oriente nettement vers le pôle sableux lors de la dessiccation, l'horizon Aa conforte sa position plus limoneuse.

Pour expliquer la différence entre horizon profond séché et horizon superficiel, on peut émettre l'hypothèse suivante : au champ, les pseudo-sables de l'horizon d'altération séché (après décapage de

l'horizon superficiel, remaniement par les pratiques culturales...) ont pu subir les contraintes énergétiques de mise en culture provoquant une fragmentation et orienter la texture vers le pôle limoneux (horizon Aa superficiel).

Figure II.7. Distributions des particules stables dans les horizons du profil O4 : andosol, 1000m
incidence du séchage préalable

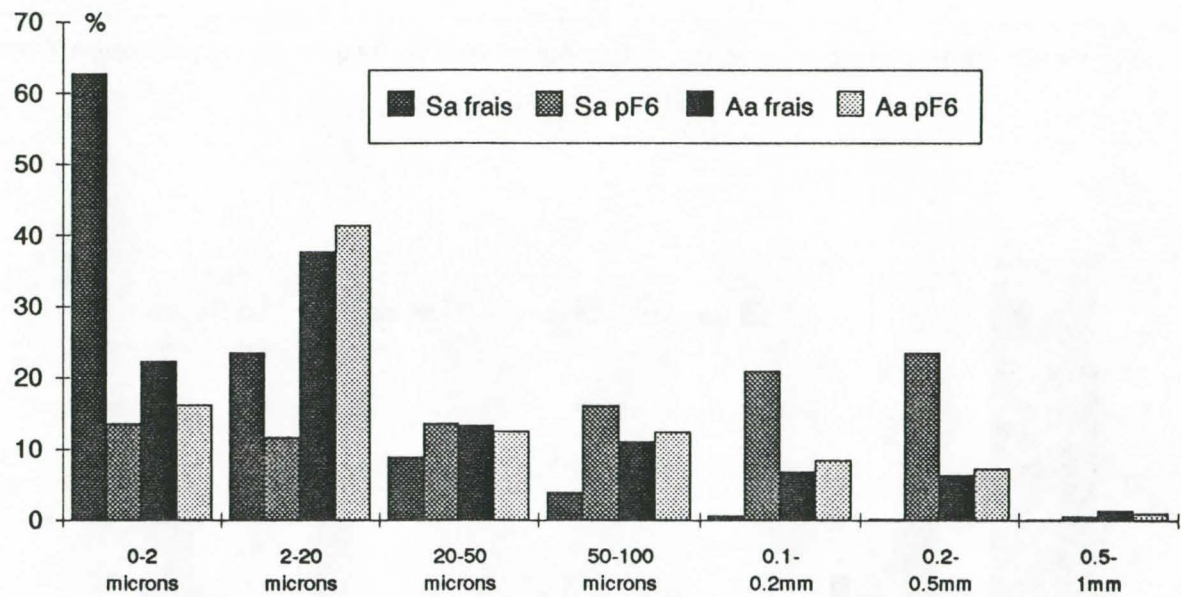
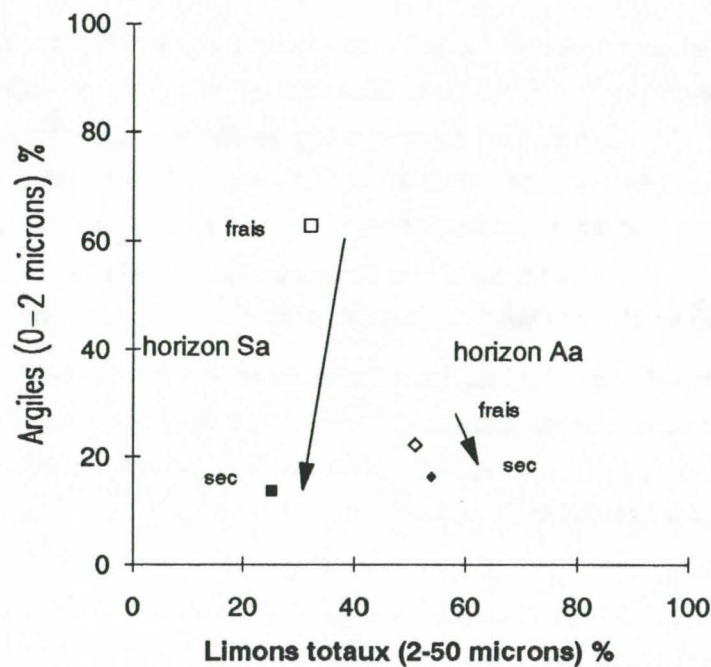


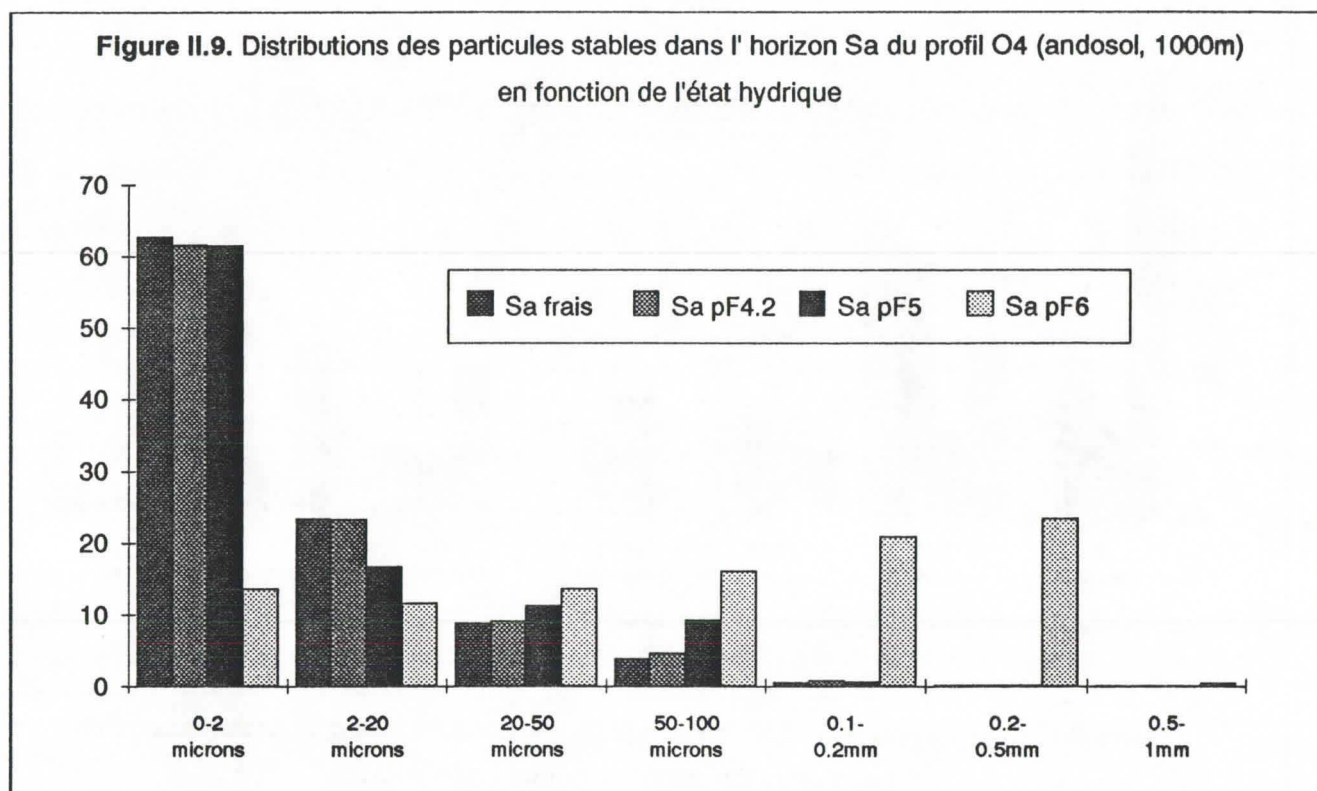
Figure II.8. Trajets granulométriques dans le profil O4, horizons frais et horizons secs (pF6)
(représentation selon le diagramme GEPPA)



3.2.3. Evolution simultanée de la texture et de l'état hydrique : recrutements et seuils

Le matériau issu de l'horizon Sa frais est soumis des potentiels hydriques croissants, la distribution des particules stables est déterminée pour chaque potentiel.

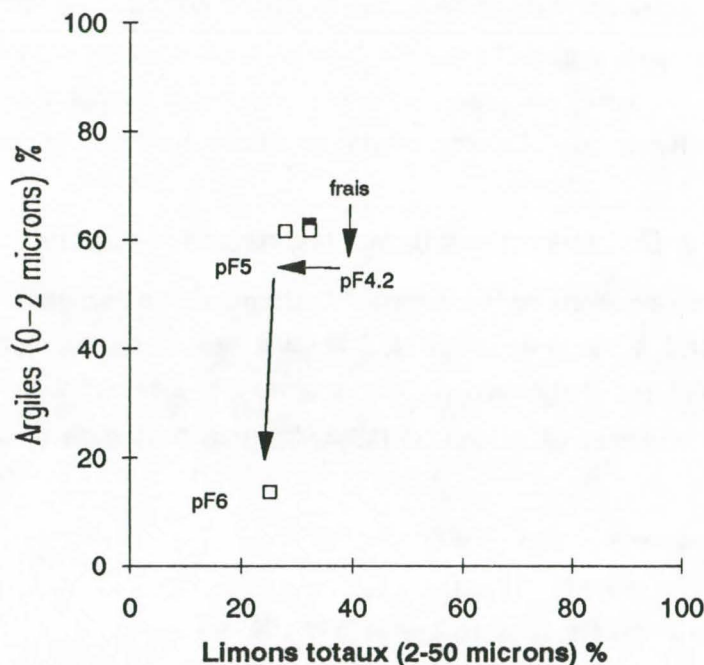
Les distributions granulométriques obtenues (figure II.9.) permettent de décomposer le processus de condensation des gels en particules stables et de définir un seuil.



Le matériau soumis à des potentiels inférieurs à pF4.2 présente une distribution identique au matériau frais. A partir de pF4.2, on note une légère évolution : perte en colloïdes et augmentation des fractions sableuses. A pF5, l'évolution est nette vers le pôle sableux sans diminution du pool de colloïdes : l'enrichissement des fractions comprises entre 20 et 100 μm (LG-SF1) se fait aux dépens de la fraction LF (2 - 20 μm). Entre pF5 et pF6, il y a mobilisation massive du pool colloïdal, le recrutement de la fraction LF se poursuit et l'enrichissement des fractions grossières est spectaculaire, avec en particulier l'apparition de pseudo-sables très stables. On note que la taille maximale de ces particules stables atteint 500 μm .

L'expression de ces résultats sous forme de trajets granulométriques (figure II.10.) souligne bien ces processus de recrutements successifs : entre pF4.2 et pF5, il y a réduction du pool limoneux et maintien du pool colloïdal ; entre pF5 et pF6, le recrutement massif des colloïdes s'opère et la texture s'oriente nettement vers le pôle sableux.

Figure II.10. Trajets granulométriques dans l'horizon O4Sa au cours de la dessiccation (représentation selon le diagramme GEPPA)



3.3. Discussion

3.3.1. Distribution des particules et propriétés physiques macroscopiques

Sur matériau à halloysite, la distribution des particules stables évolue entre pF5 et pF6.

Sur matériau à amorphes et gibbsite, on a pu montrer une évolution de la distribution des particules stables à partir de pF4.2.

L'évolution de la texture au cours de la dessiccation apparaît comme l'initiation de processus d'agrégation dans les matériaux andiques frais, ceux-ci étant *in situ* sans structure nette. La néogénèse d'un squelette sablo-limoneux stable doit conférer au matériau des propriétés macroscopiques nouvelles, sans modifier ses propriétés physico-chimiques : PENSEC (1987) montre que des séchages drastiques (étuvage, pF7) ne modifient pas significativement les résultats d'analyses chimiques sur des andosols de la Réunion.

Les mécanismes précis d'agrégation de la matrice colloïdale en dessiccation restent à déterminer, par des études micro-morphologiques. Il faut noter que la masse volumique du solide (poids spécifique γ_s) du matériau semble rester constante expérimentalement malgré le recrutement massif du pool colloïdal en agrégats sableux lors du séchage jusqu'à pF6. WESLEY (1973) montre que sur des latosols d'Indonésie, équivalents à nos matériaux halloysitiques, seul l'étuvage à 105 °C (pF7) provoque une diminution faible de γ_s (de l'ordre de 1%), sur matériaux à allophanes (andosols), le séchage à l'air a un effet équivalent, l'étuvage provoquant une diminution plus importante (de l'ordre de 5 à 10%). Sur matériau andique, BONFILS et MOINEREAU (1971) attribuent la différence de poids spécifique entre horizon superficiel et horizon profond, à un effet de la M.O. (teneur très élevée en surface).

Les mesures de γ_s sur les matériaux andiques O4Sa et O4Aa minéralisés (calcination à 1 100 °C sur un banc) sont très comparables (proches de 3.1 g/cm³, contre 2.69 mesuré sur O4Sa frais, et 2.46 mesuré sur O4Aa frais). Cela confirme que les taux de matière organique élevés diminuent l'estimation de γ_s . Mais compte tenu des distributions de particules stables comparables entre matériau profond séché et matériau superficiel, on peut supposer également que les micro-agrégats organo-minéraux engendrés par séchage (expérimental ou naturel) présenteraient une microporosité remplie d'air et inaccessible au liquide mouillant utilisé pour la mesure de γ_s . Ces micro-agrégats stables étant détruits par calcination.

3.3.2. Distribution des particules stables et structure

A partir d'observations en microscopie électronique à balayage, HETIER (1975) définit une structure élémentaire de 5 à 10 μm de diamètre, à la base de l'organisation des andosols. MAEDA *et al.* (1977) décrivent d'autres types d'organisation : "domains" de 0.01 à 1 μm , "clusters" (amas) de 1 à 100 μm . Les études micromorphologiques de ROSELLO (1984) intègrent l'ensemble et décèlent différents niveaux de structure imbriqués:

- nanoagrégat élémentaire (0.1 - 1 μm)
- polyagrégat de 1^{er} ordre (5 - 10 μm)
- polyagrégat de 2^{ème} ordre ou microagrégat (50 - 100 μm)

Ces microagrégats s'amassent en une microstructure continue (agrégats de 0.1 à 1 mm) dans le sol frais. ROSELLO met cette organisation en évidence lors de la dessiccation ; elle préexisterait dans le sol frais. DENAIX (1989) confirme l'existence des nanoagrégats élémentaires dans le sol frais, mais précise que l'apparition de microagrégats semble liée à l'activité biologique (macrofaune du sol), ou à la dessiccation. Dans le sol en place, l'aggrégation est un phénomène marginal.

Nos propres résultats vont dans ce sens : dans le matériau frais, la fraction colloïdale domine largement, elle correspond à la matrice organo-minérale dispersée ou organisée en nanoagrégats élémentaires. La dessiccation mobilise cette fraction.

Dans les horizons superficiels soumis aux contraintes bioclimatiques et anthropiques, divers processus s'additionnent : plusieurs cycles de dessiccation ont généré un squelette grossier stable à partir de la matrice amorphe à microstructure continue. L'activité biologique renforce cette tendance (formation de macroagrégats moins stables), et la mise en culture occasionne des contraintes mécaniques qui peuvent re-fractionner ces macro-structures. Des contraintes mécaniques plus importantes et très localisées (pistes, chemins, horizons superficiels sarclés régulièrement...) sont à l'origine d'une évolution des structures générées par dessiccation vers un pôle limoneux fins, d'aspect pulvérulent et soufflé, facilement mobilisable par le vent.

Les processus de dessiccation modifient la texture du matériau (évolution de la répartition pondérale des particules élémentaires stables minérales ou non) et initient une aggrégation irréversible. Les notions de texture et de structure sont donc délicates à délimiter.

Les manipulations ont été réalisées sur du matériau sans structures construites, en vrac. L'évolution de l'architecture de la fraction solide dans le sol en place peut être un peu différente. Cependant, pour les horizons superficiels à structure agrégée de type plutôt particulière, les processus peuvent être simulés.

Le protocole proposé permet d'obtenir des résultats comparables entre eux. Compte tenu des variations importantes observées lorsqu'on modifie même légèrement ce protocole (paramètres de sonification, attaque de la M.O...), il convient d'extrapoler ces données avec prudence et de ne pas chercher à les comparer formellement avec des résultats obtenus par ailleurs.

Il faut vérifier la compatibilité des observations effectuées sur la fraction organo-minérale (phase solide) avec les caractérisations et fonctionnements physiques macroscopiques. C'est l'objectif de la suite de cette partie. L'étude de l'état structural du matériau en place est rapportée en troisième partie.

IV. Etat hydrique et caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux

1. Rétention de l'eau et porosités

1.1. L'eau du sol : aspects énergétiques (HILLEL, 1975; TESSIER, 1984)

1.1.1. La notion de potentiel

La mécanique reconnaît deux formes principales d'énergie : l'énergie cinétique et l'énergie potentielle.

Dans les sols, les mouvements de l'eau sont suffisamment lents pour que son énergie cinétique soit considérée comme négligeable. C'est l'énergie potentielle qui détermine l'état et les mouvements de l'eau du sol.

Le potentiel total ψ_t , relatif à un état énergétique S_o (AISS, 1976), se décompose en :

$$\psi_t = \psi_g + \psi_o + \psi_p$$

ψ_g est le potentiel gravitaire (ou potentiel de position) et dépend de la hauteur relative entre un point déterminé du sol et un niveau de référence. ψ_g est indépendant de la composition chimique et de la pression de l'eau.

ψ_o est le potentiel osmotique et correspond à la perte d'énergie potentielle de l'eau en présence d'électrolytes dans la phase liquide par rapport à l'eau pure. Lorsque la solution du sol est peu concentrée, ψ_o est négligeable par rapport aux autres composantes de ψ_t .

ψ_p est le potentiel de pression. On distingue :

- * $\psi_p > 0$, ce potentiel intervient dans les mouvements d'infiltration et de drainage sous une nappe d'eau (submersion).
- * $\psi_p = 0$, à la surface d'une nappe d'eau libre (ruissellement).
- * $\psi_p < 0$, le potentiel de pression négatif (potentiel matriciel) résulte des forces capillaires et des forces d'adsorption sur les particules solides, qui diminuent la pression de l'eau P_w par rapport à la pression de l'eau libre P_o .

Dans les faits, la plus grande partie de l'eau du sol échappe à la gravité, c'est le potentiel matriciel (ou succion matricielle) qui détermine rétention et circulation de l'eau dans le sol.

L'énergie potentielle totale ψ_t exprimée par unité de poids est la charge hydraulique H .

1.1.2. Le potentiel matriciel

Les molécules d'eau à l'interface entre deux phases (liquide - gaz ou liquide - solide) sont soumises à une attraction différente de celles qui sont présentes dans le liquide. Cette attraction est à l'origine de tensions interfaciales γ , responsables de l'adhésion de gouttes liquides sur des particules solides

(adsorption) et de l'ascension et la rétention capillaire. Ainsi une goutte d'eau posée sur un solide dans un environnement de vapeur est soumise à 3 tensions interfaciales ; à l'équilibre, on a :

$$\gamma_{\text{solide-vapeur}} = (\gamma_{\text{solide-liquide}} + \gamma_{\text{liquide-vapeur}}) \cdot \cos\theta \quad (\theta \text{ angle de courbure de l'interface})$$

Les effets de courbure des interfaces génèrent des potentiels matriciels modérés (> -1 bar), les forces d'adhésion moléculaire (de type électrostatique) occasionnent des potentiels plus importants.

L'ascension capillaire est régie par ces forces interfaciales. Un ménisque apparaît dans un capillaire partiellement plongé dans un liquide. Le liquide monte jusqu'à une hauteur h .

A l'équilibre, on a :

$$2\gamma\cos\theta/r = h \cdot \rho_w \cdot g \quad (\text{Loi de Jurin})$$

Où r est le rayon de courbure du ménisque, assimilé à celui du capillaire, ρ_w la masse volumique du liquide, g l'accélération de la pesanteur, γ la tension à l'interface liquide-vapeur (pour l'eau à 20°C , $\gamma = 72 \cdot 10^{-3} \text{ N.m}^{-1}$).

A cet équilibre, et en considérant le ménisque comme hémisphérique ($\theta = 0$, mouillabilité parfaite), la différence de pression entre la surface concave P_w et la pression à l'état de référence P_o est égale à la pression hydrostatique de la colonne de liquide :

$$P_o - P_w = 2\gamma/r \quad (\text{Loi de Laplace})$$

Dans le sol, la succion matricielle $P_o - P_w$ est donc inversement proportionnelle à la taille des pores, assimilés à des tubes capillaires cylindriques.

En d'autres termes, l'énergie qu'il faut appliquer pour enlever l'eau d'une gamme de pores (à partir d'un rayon r) peut être évaluée par une équivalence à la hauteur h de la colonne d'eau, soit :

$$h = (P_o - P_w)/\rho_w \cdot g$$

Le logarithme décimal de cette hauteur d'eau équivalente (en cm) est appelé pF (par analogie avec le pH, pF signifiant "potential of free energy" -SCHOFIELD, 1935-) :

$$pF = \log h$$

Le rayon de pore équivalent est calculé en exprimant le potentiel de l'eau par la valeur de succion nécessaire pour extraire l'eau qui lui correspond (HILLEL, 1980; BRUAND, 1986) :

$$r = (2\gamma\cos\theta)/P$$

A partir de ces relations, on conçoit aisément que l'augmentation de la succion entraîne un drainage de pores de plus en plus fins et une réduction de l'épaisseur des couches d'hydratation qui couvrent les particules solides. Une augmentation de la succion est donc associée à une diminution de la teneur en eau du sol, l'état saturé correspondant à une succion matricielle nulle. On considère que l'on a vidé le réservoir sol (état anhydre) au-delà de pF 7 (10^7 cm d'eau, équivalent à un séchage prolongé à 105°C).

En toute rigueur, le modèle de pore équivalent ("*water-filled pores*" de la littérature anglo-saxonne) s'applique aux étranglements existants dans un pore et ne fournit pas d'information sur la géométrie réelle des volumes poraux sur lesquels les constriction débouchent (BRUAND, 1986). Pour des matériaux rigides parfaits, il est possible de déterminer la distribution volumique des tailles de pores équivalents en appliquant toute une gamme de potentiels à l'échantillon.

Pour des matériaux déformables, il est impossible d'appliquer cette technique : on ne peut connaître que la taille de pore correspondant à un potentiel donné, dans la mesure où le devenir des pores vidangés à un potentiel donné reste incertain lorsqu'on applique un potentiel supérieur, ces pores peuvent être rigides dès lors qu'ils sont vidés, ou se déformer encore, voire disparaître. *A contrario*, des fissures de grande taille peuvent apparaître.

1.2. Approches expérimentales des relations état énergétique - teneur en eau

Pour évaluer l'affinité du matériau andique pour l'eau et observer l'évolution de l'espace poral sous l'effet de contraintes hydriques, il nous faut mesurer les teneurs et les états énergétiques de l'eau du sol, au champ lorsque cela est possible, et sur échantillons en laboratoire.

Seul le potentiel matriciel est à considérer : potentiels gravitaire et osmotique sont négligeables (taille des échantillons, solution du sol) lors de la manipulation au laboratoire; au champ, le potentiel gravitaire est aisé à déterminer.

Au champ, la gamme de variation du potentiel matriciel s'étend de la saturation (potentiel nul) à environ pF 6 (10^6 cm d'eau) dans les couches les plus superficielles et en période sèche.

L'ensemble des méthodes expérimentales employées doit permettre de couvrir cette gamme, y ajoutant en plus l'état anhydre de référence (pF 7, séchage à 105°C) où l'indice d'eau θ est nul.

Figure II.11. Niveaux énergétiques et propriétés de l'eau, méthodes de mesure dans les sols :

Hauteur de la colonne d'eau	pF	Humidité rel. de l'air	Diamètre maximal des pores remplis d'eau	Méthode expérimentale pour fixer ou mesurer ψ_p	Pression d'air appliquée (1 bar = 100kPa)
10cm	1.0	≈100%	300 μm	Tensiométrie Infiltrométrie	0.01 bar
100cm	2.0	99.99%	30 μm	Pression de gaz (plaque) Tensiométrie	0.1 bar
1000cm	3.0	99.93%	3 μm	Pression de gaz (plaque)	1 bar
10^4cm	4.0	99.29%	0.3 μm	Pression de gaz (membrane)	10 bars
15 800cm	4.2	98.88%	0.19 μm	Pression de gaz (membrane)	15.8 bars
10^5cm	5.0	93.12%	0.03 μm	Equilibre en phase vapeur	-
10^6cm	6.0	49.03%	0.003 μm	Equilibre en phase vapeur	-
10^7cm	7.0	00.08%	-	≈séchage à 105°C	-

Concernant l'état saturé, il est difficile expérimentalement de contrôler un potentiel nul et de mesurer la teneur en eau correspondante : l'eau s'évacue sous son propre poids des pores les plus gros (ψ_t dépend principalement de ψ_p). Au champ, cet état saturé vrai est transitoire, très fugace dans les horizons structurés à macropores, une perte rapide de l'eau soumise à la gravité amène le sol andique à sa capacité au champ (estimée à pF2 par LOYNET, 1975 ; à pF1.8 par JOUVE, 84 ; à pF1.7 par MAEDA et al., 1983).

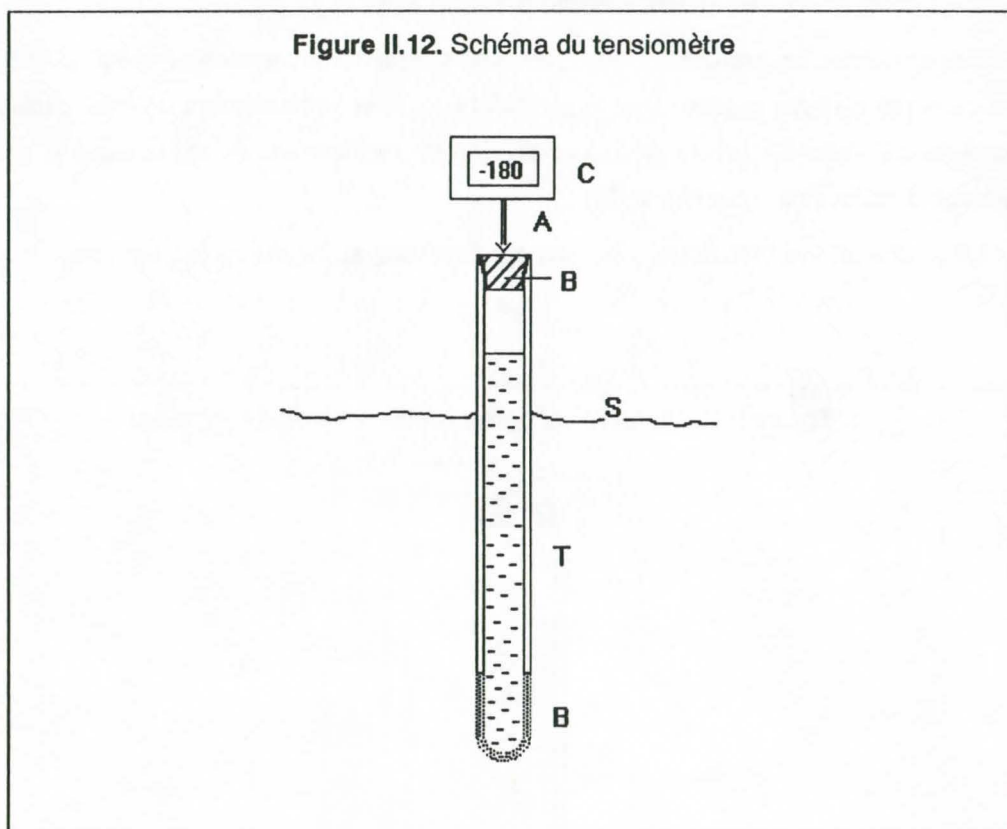
Expérimentalement, on considère généralement que le matériau andique est saturé à pF1 (ROSELLO, 1984), soit à un potentiel équivalent à une pression hydrostatique de 10 cm. Cela correspond au remplissage de tous les pores de taille inférieure à 300 μm .

Les mesures d'état énergétique de l'eau dans le sol par tensiométrie valident ce choix : le pF mesuré n'est jamais inférieur à 1.

1.2.1. Mesures au champ

□ La tensiométrie

Le tensiomètre est constitué d'un tube creux de plexiglass T (canne) et d'une capsule de céramique poreuse B (bougie). L'ensemble est rempli d'eau dégazée et déminéralisée, et peut être relié à un dispositif manométrique C. Au contact bougie-sol, il s'établit un équilibre entre pression de l'eau du sol, pression de l'eau et de l'air de la canne. La mesure de la pression de l'eau ou de l'air contenus dans la canne permet d'avoir accès à la pression de l'eau du sol (charge hydraulique) à la cote de la bougie. On peut donc évaluer la succion matricielle en soustrayant à la charge hydraulique la part de charge gravitaire liée à la différence de niveau entre la hauteur d'eau présente dans la canne et la surface du sol S.



La mesure s'effectue par un capteur électronique de dépression portatif (C), relié à une aiguille creuse A qui perfore un bouchon de néoprène B lorsque l'on effectue la mesure. Contrairement au mode opératoire proposé par le constructeur, THONY et *al.* (1990) préconisent une prise de mesure dans un volume d'air maintenu constant au sommet de la canne.

L'appareillage utilisé permet une mesure de la tension de l'eau du sol entre 0 (saturation) et 850 - 900 millibars (soit pF2.9).

Très utilisé pour le pilotage de l'irrigation, la tensiométrie nous a permis *in situ* :

- de connaître la gamme de variation de l'état énergétique de l'eau du sol,
- d'appréhender les relations succion / teneur en eau du sol pour des conditions proches de la saturation, difficiles à aborder en laboratoire,
- de comparer les relations obtenues à des suctions plus fortes avec celles obtenues par d'autres techniques.

□ L'infiltrométrie à succion contrôlée

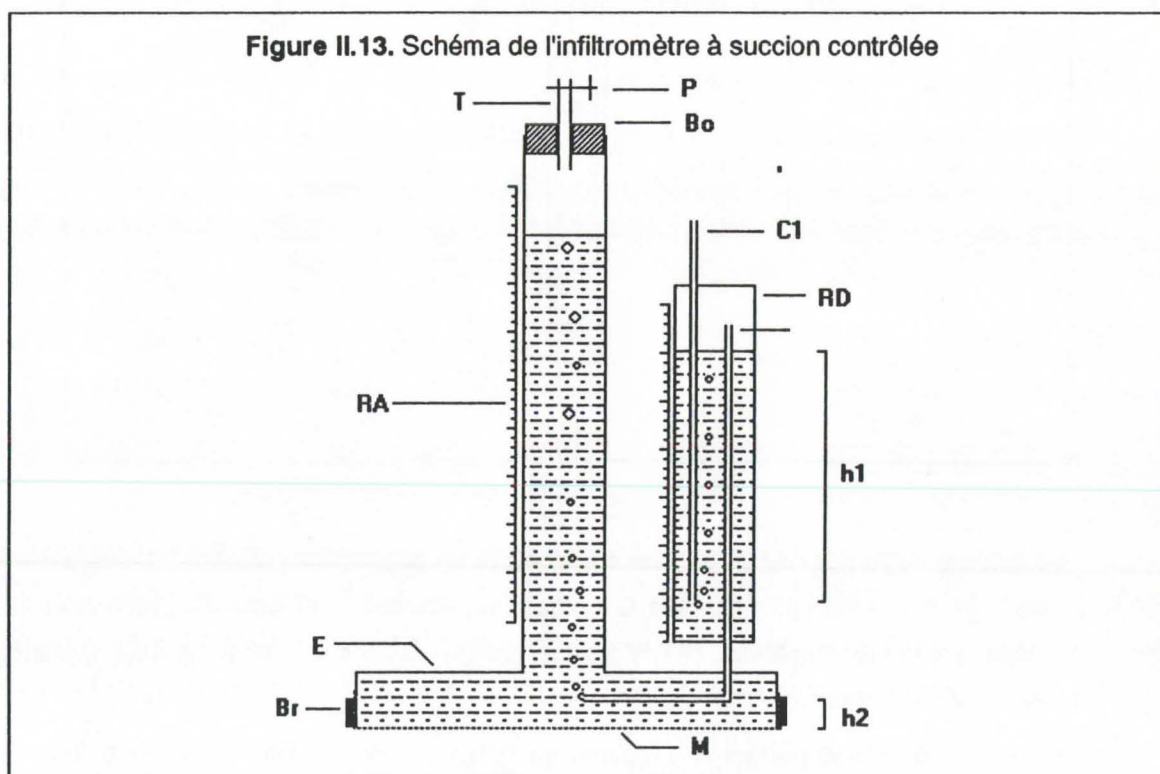
a. Dispositif

Ce dispositif expérimental, conçu d'après CLOTHIER et WHITE (1981) et PERROUX et WHITE (1988), a été mis au point par le groupe Hydrologie de l'Institut de Mécanique de Grenoble (THONY, 1990). Il permet de réaliser *in situ* des essais d'infiltration sous charge négative constante et comporte 3 infiltromètres S1, S2 et S3, de diamètres d'embase différents (respectivement 250, 80 et 48.5 mm).

Un infiltromètre se compose d'une embase E sur laquelle est tendue une membrane M constituée d'une toile en nylon tissé (maille : 20 microns) en contact avec le sol. Cette embase est surmontée d'un réservoir d'alimentation gradué RA, fermé à son sommet par un bouchon Bo dans lequel est engagé un tube T muni d'un tuyau souple et d'une pince de Mohr P.

Cet ensemble est complété par un réservoir latéral de dépressurisation RD partiellement rempli d'eau et constitué par un tube gradué dans lequel peut coulisser verticalement un tube capillaire d'aération C1. Un deuxième capillaire C2 assure la communication de ce réservoir avec l'embase E (S1) ou avec la base du réservoir d'alimentation RA (S2 et S3).

L'étanchéité des différentes jonctions coulissantes ou démontables est assurée par des joints toriques.



b. Principe

Si h_1 est la hauteur d'eau surmontant l'extrémité basse du tube C1, h_2 la différence de niveau entre l'extrémité basse du tube C2 et le plan constitué par la membrane M, la pression de l'eau h_0 exprimée en hauteur d'eau par rapport à la pression atmosphérique est, au niveau de la membrane: $h_0 = h_2 - h_1$

On observe que h_0 est négatif lorsque h_1 est supérieur à h_2 . Cette valeur dépend du positionnement du tube C1 et détermine la succion imposée pour un essai d'infiltration donné. Ce dispositif constitue un vase de Mariotte à charge constante, indépendant du niveau de l'eau dans le réservoir d'alimentation.

Cette technique a pour but principal la détermination au champ de paramètres hydrodynamiques lors d'essai d'infiltration. Les résultats que nous avons obtenus dans ce domaine sont exposés dans la troisième partie.

Par une mesure de teneur en eau dans le bulbe d'infiltration développé sous la membrane, dans lequel l'eau est à l'état énergétique imposé par l'infiltromètre, nous avons pu obtenir *in situ* des valeurs couplées potentiel matriciel - teneur en eau. Une analyse de la macroporosité fonctionnelle est donc possible par cette méthode.

L'appareillage autorise des valeurs de h_0 comprises entre 0 (succion nulle) et 200 mm (équivalente à 19,6 millibars ou pF 1.3).

☐ Approche volumique

Au champ, la maîtrise des volumes nécessite l'utilisation de cylindres de prélèvement ou de la sonde gamma-neutronique (donnant accès à γ_d et θ).

1.2.2. Mesures en laboratoire

☐ Par pression pneumatique

Les courbes potentiel - teneur en eau ont été obtenues en soumettant les échantillons à des pressions pneumatiques dans une enceinte close, en pression de vapeur d'eau saturante.

Cette méthode est fondée sur le principe suivant : l'eau retenue dans un pore cylindrique de rayon r , par une force $F = 2\pi r \gamma \cos\theta$, n'est chassée que si la pression pneumatique $P\pi r^2$ lui est supérieure :

$$P > 2 \gamma \cos\theta / r \quad \text{où } P = \psi_p$$

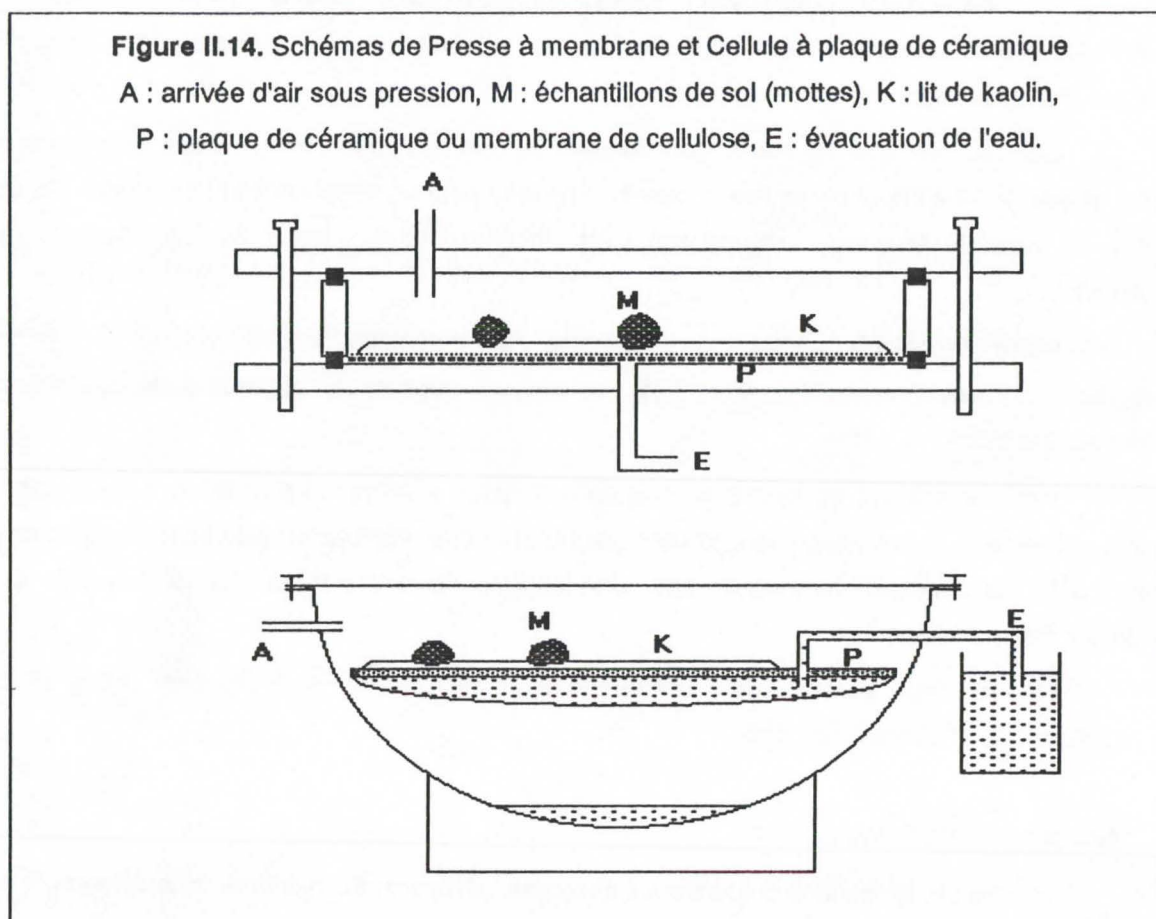
A une pression donnée, tous les pores de taille supérieure ou équivalente à cette pression seront donc vidés (voir figure II.11.).

Deux types de matériel ont été mis en oeuvre (figure II.14.) :

- une enceinte à plaque de céramique poreuse de pF 1.8 (63.1 millibars) à pF 3.5 (3.16 bars), des plaques de porosité différentes ont été utilisées selon le potentiel de pression exercé,

- une presse à membrane cellulosique de pF 3.8 (6.31 bars) à pF 4.2 (15.8 bars) (Appareil de RICHARDS, 1941). Les membranes, de pores d'environ 2 nm, autorisent une étude de la rétention de l'eau à des potentiels élevés.

Les échantillons en vrac, tamisés à 2 mm, ou des mottes centimétriques ont pu être manipulés. Pour celles-ci, un lit de kaolin assure le contact avec les plaques et les membranes.



☐ Par contrôle de l'humidité relative : équilibre en phase vapeur

Pour atteindre des potentiels élevés, inaccessibles par pression pneumatique, des techniques basées sur la relation entre l'humidité relative de l'air et le potentiel de l'eau sont utilisées. La succion de l'eau dans un échantillon de sol est reliée à la vapeur d'eau de l'atmosphère suivant la loi de Kelvin :

$$pF = \log(\psi_m) = \log(h) = \log((-RT/M_w \cdot g) \cdot \ln(P/P_0))$$

Avec :	R	constante des gaz parfaits (kg.s ⁻² .°K ⁻¹ .mol ⁻¹)
	T	température absolue (°K)
	M _w	masse moléculaire de l'eau (kg.mol ⁻¹)
	g	accélération de la pesanteur (m.s ⁻²)
	P ₀	pression de vapeur d'eau saturée (kg.s ⁻² .m ⁻²)
	P	pression de vapeur de l'eau dans le sol (kg.s ⁻² .m ⁻²)
		(humidité relative de l'air = HR = P/P ₀ %)

A température constante, l'humidité relative détermine donc le pF. Pour soumettre des échantillons à une humidité relative choisie, on peut les placer par exemple dans un dessiccateur contenant une solution d'acide sulfurique de concentration déterminée. D'après les courbes pression partielle de vapeur d'eau - pF, VAN OORT (1984) montre que l'on obtient une grande précision au-delà de HR = 95% (pF4.8).

Ainsi, nous avons utilisé le séchage à l'air prolongé (avec HR = 50% et à une température d'environ 25 °C) pour simuler une contrainte hydrique équivalente à pF 6.

Dans une enceinte close, à 20 °C, une solution d'acide sulfurique H₂SO₄ à 200 g/l déshydrate l'air ambiant jusqu'à une humidité relative de l'ordre de 93%, soit une hauteur d'eau équivalente de 10⁵ cm (pF 5) imposée aux échantillons.

□ Approche volumique

La mesure du volume apparent au pétrole, décrite par MONNIER et *al.* (1973), puis BEAUMONT et *al.* (1989) est effectuée sur des échantillons non remaniés (mottes) à un potentiel de pression déterminé (fixé par pression pneumatique ou équilibre en phase gazeuse).

Elle est basée sur le principe de la poussée d'Archimède par déplacement et pesée après immersion dans du pétrole désaromatisé, peu volatil et de faible interaction physico-chimique avec la phase solide de l'échantillon. Ainsi sur un même échantillon, il est possible de connaître volume apparent, poids sec et teneur en eau à une succion donnée.

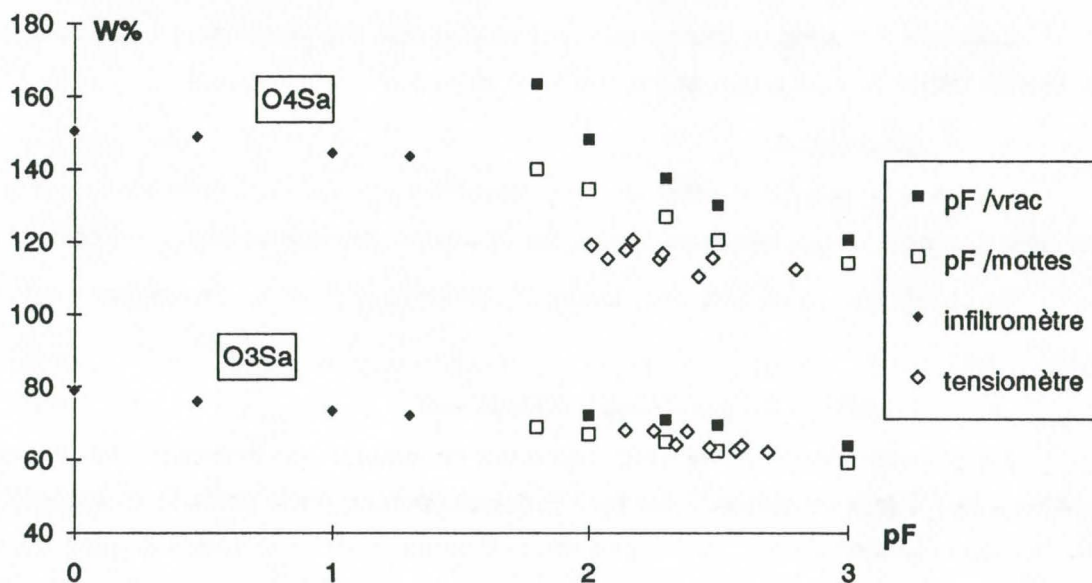
1.2.3. Comparaison des méthodologies employées et variabilité des mesures

Il est délicat de mettre en relation des résultats obtenus avec des méthodes dont l'échelle d'investigation, la reproductibilité, la variabilité sont différentes.

□ Valeurs moyennes (moyenne arithmétique X)

Les résultats obtenus *in situ* (tensiométrie, infiltrométrie) et en laboratoire (sol remanié ou en vrac) concernant les relations teneur en eau - potentiel de l'eau sont présentés ici, sur deux sites correspondants aux profils O3 (andosol, 780 m) et O4 (andosol, 1000 m).

Figure II.15. Relations teneur en eau (W%) - potentiel de l'eau (pF) selon 4 méthodes analytiques
Profil O3 : Andosol saturé, 780 m. / Profil O4 : Andosol désaturé, 1 000 m.



On note que :

- les 4 méthodes donnent des résultats très comparables sur le site de Colimaçons (O3), en revanche les résultats sont plus dispersés sur l'andosol de Cocâtre (O4),
- les teneurs en eau obtenues en fixant la succion par pression d'air sur du sol en vrac sont plus élevées que celles obtenues sur des mottes centimétriques, particulièrement à Cocâtre, cette tendance est très nette pour les suctions faibles, inexistante pour les suctions fortes ($> pF3$),
- sur les deux sites, les teneurs en eau obtenues en fixant la succion par infiltrométrie sont compatibles avec les résultats précédents, la continuité étant bien assurée avec les résultats obtenus sur mottes. Dans le premier cas, il y a remplissage des vides (sorption), dans le cas des pF sur mottes, il y a vidange (désorption). Les conditions d'hystérèse étant réunies (HILLEL, 1975), il apparaît délicat de mettre en relation les deux types de données. On observera cependant qu'une bonne conjonction expérimentale est obtenue et cela dans des conditions proches de la saturation, où l'hystérèse n'est pas marquée.

□ Dispersion des résultats

La dispersion observée est liée : soit à la variabilité spatiale des caractéristiques du sol pour ce qui concerne les mesures de terrain (tensiométrie, infiltrométrie), elle est alors générée par les répétitions nécessaires ; soit à la nature des objets analysés pour ce qui concerne les mesures par pression d'air (hétérogénéité des mottes issues d'un même horizon...). Compte tenu des gammes de teneur en eau et de succion prospectées, l'écart type σ_{n-1} moyen pour l'ensemble des mesures n'est pas très éloquent et nous avons recours à un paramètre de dispersion relatif : le coefficient de variation $V = \sigma_{n-1} / X$, sans unité et exprimé ici en %, sous forme de chiffres arrondis.

Tensiométrie

La variabilité intéresse les deux données obtenues : succion et teneur en eau. Les sites de mesure couvrent environ 2 m² et comprennent 4 à 6 tensiomètres. La mesure de teneur en eau se fait sur le site (3 prélèvements). La dispersion observée pour l'ensemble des résultats est la suivante :

Teneur en eau $W\%$: $V = 3.5\%$

Succion pF : $V = 1\%$

Concernant la succion, la dispersion est un peu plus importante pour les valeurs élevées que pour les valeurs faibles ($V = 0.5\%$ vers $pF2.0$, $V = 1.3\%$ vers $pF3$).

Infiltrométrie

Par principe, la succion est fixée. Un prélèvement effectué sous l'embase fournit la teneur en eau. Les deux diamètres d'embase nécessaires et les répétitions génèrent une variabilité de cette mesure.

On obtient pour l'ensemble des teneurs en eau un coefficient de variation par succion de l'ordre de 2%.

Humidimétrie après pression pneumatique

Par principe, la succion est fixée, cependant on observe une dispersion supplémentaire d'une manipulation à l'autre (aux pF faibles, il est parfois délicat de contrôler la pression d'air appliquée). Deux types de répétitions sont effectuées : plusieurs mottes ou amas de sol en vrac virtuellement identiques sont soumis ensemble à la même pression d'air, cette manipulation est répétée 2 ou 3 fois.

La dispersion observée est la suivante :

A pF 2, moyenne des V calculés par manipulation (5 à 6 répétitions),	sol en vrac : V = 2%, mottes : V = 4%
A pF 2, V calculé sur l'ensemble des répétitions (2 à 3 manipulations),	sol en vrac : V = 2.5%, mottes : V = 5%
A pF 4.2, moyenne des V calculés par manipulation (5 à 6 répétitions),	sol en vrac : V = 1%, mottes : V = 1%
A pF 4.2, V calculé sur l'ensemble des répétitions (2 à 3 manipulations),	sol en vrac : V = 1%, mottes : V = 1.5%

Humidimétrie après équilibre en phase gazeuse

3 à 5 répétitions (mottes) ont été réalisées pour obtenir les données de teneur en eau à pF6 et pF5, en une seule manipulation par pF. Les coefficients de variation sont dans les deux cas proches de 2%.

Malgré une variabilité légèrement supérieure des résultats obtenus sur mottes par rapport au vrac, il a été choisi d'étudier les relations teneur en eau - potentiel de l'eau, puis la porosité, sur ce type d'échantillon : la maîtrise des volumes est aisée, les données sont compatibles avec celles obtenues au champ (infiltromètre, tensiomètre).

1.3. Affinité pour l'eau : relations teneur en eau / potentiel de l'eau

Des courbes Teneur - Potentiel de l'eau (exprimé en pF) sont établies, tout d'abord sur l'ensemble des horizons d'altération (B ou Sa, horizons cambiques, de diagnostic dans la classification américaine), puis sur divers horizons culturaux soumis à différents niveaux de contrainte hydrique préalable. Les teneurs en eau sont exprimées en indice d'eau afin de pouvoir comparer les profils entre eux. Le tableau II.18. indique les teneurs en eau pondérales correspondantes. Les échantillons sont constitués de mottes centimétriques et de matériau en vrac (les mottes séchées se désagrègent généralement à la réhumectation).

Evolution de l'indice d'eau en fonction du pF :

Figure II.16. Séquence ouest :

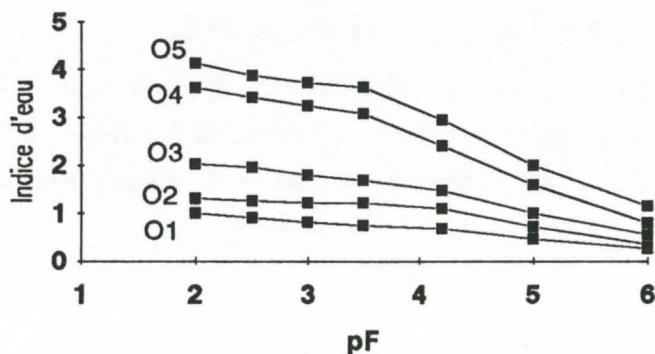


Figure II.17. Séquence sud :

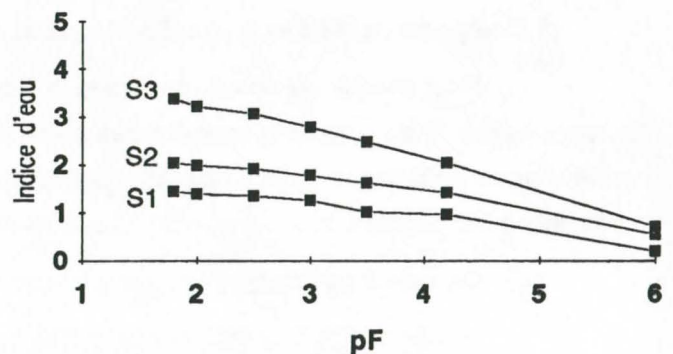


Figure II.18. Teneur en eau pondérale W% en fonction de la succion par horizon

Horizon	pF2	pF3	pF4.2
O1A	31.9%	25.9	22.3
O1B	35.8	29.2	24.2
O2A	48.3	40	33.6
O2B	45.3	42.4	38
O3Aa	43.5	39.1	31.8
O3Sa	72.1	63.8	52.2
O4Aa	65.7	56.5	39.8
O4Sa	134.6	102.6	89.6
O5Aa	121.2	95.7	73.6
O5Sa	153.3	138.5	109.6
S1A	37.5	34.8	28.1
S1B	46.3	41.8	31.8
S2Aa	59.3	50.6	42.3
S2Sa	78.7	70.6	56.5
S3Aa	74.1	58.6	39.2
S3Sa	122.9	106.6	78.1

1.3.1. Séquences altitudinales et types d'horizons

□ Comportements des horizons d'altération B et Sa (figures II.16-17-18)

Sur les deux séquences étudiées, l'affinité des sols pour l'eau augmente nettement avec l'altitude et leur caractère andique, la rétention devenant très forte dans l'horizon Sa des andosols d'altitude. On note la similitude de comportement entre les sols des deux séquences, issus d'un même matériau cendreux originel.

La forme générale des courbes est conforme à celle obtenue généralement sur matériaux andiques à teneur modérée en allophanes et riches en halloysite : presque linéaire, légèrement sigmoïde et aplatie (MAEDA et WARKENTIN, 1975). Les andosols à allophanes dominants (O5) présentent une courbe plus nettement sigmoïde.

Compte tenu de la similitudes des taux en fractions colloïdales entre les différents matériaux (chapitre III.2.4.), seule la qualité minéralogique de ces fractions peut expliquer les différences d'affinité pour l'eau (partie I, chapitre II.3.4.).

□ Comportements des types d'horizons et état hydrique initial (figures II.19-20-21-22)

Pour chaque sol étudié, on distingue l'horizon d'altération B ou Sa et l'horizon superficiel A ou Aa. Les courbes indice d'eau - succion sont établies selon deux modalités : le matériau est conservé à son humidité de prélèvement et n'a donc pas subi de séchage préalable (échantillons frais) ou le matériau est soumis à un séchage préalable à l'air pendant 1 semaine, à 20 °C et 50% d'humidité relative (équivalent à pF 6).

On note 2 grands types de comportement :

⇒ 380 m (O1, brunisol) et 620 m (O2, brunisol andique) :

* La différence entre horizon profond et superficiel (A et B) est peu marquée.

* Les horizons séchés à l'air présentent une affinité pour l'eau supérieure pour les faibles potentiels (pF2), un peu inférieure pour les forts potentiels par rapport aux horizons frais.

Figure II.19 :

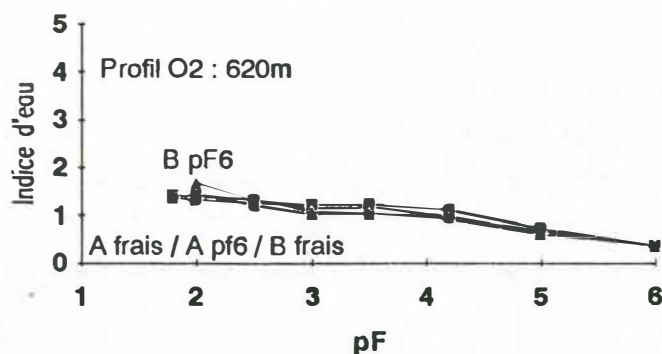
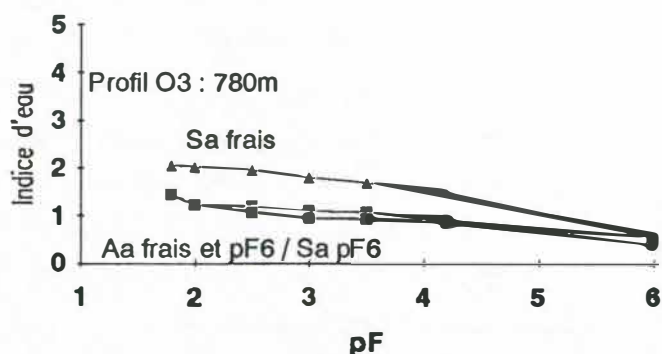


Figure II.20. :



⇒ 780 m - 1000 m - 1 230 m (O3-O4-O5, andosols) :

* La différence entre horizon Aa et Sa frais est nette.

* Le séchage à l'air de l'horizon Sa provoque une chute importante et irréversible de son affinité pour l'eau et le ramène au niveau de l'horizon Aa superficiel.

* Le séchage de l'horizon Aa modifie peu son comportement sauf à partir de 1 230 m (andosol perhydraté)

Le profil S1 (500 m, séquence sud) présente un comportement intermédiaire entre les profils O2 et O3. Les andosols de la séquence sud (S2 et S3) ont des comportements identiques à ceux de la séquence ouest.

Figure II.21 :

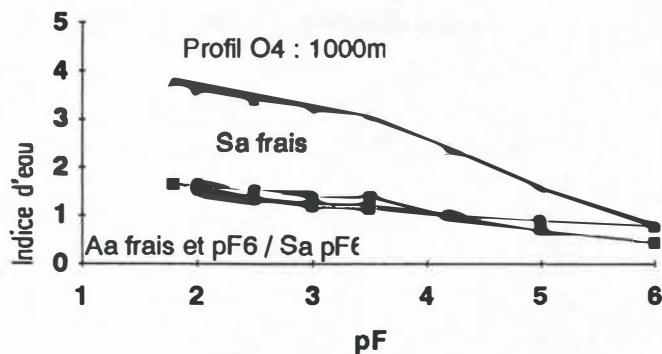
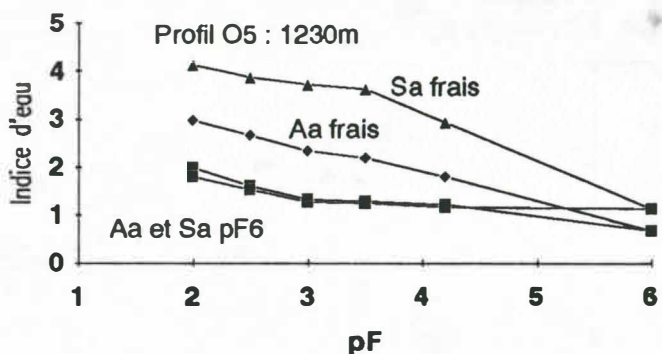


Figure II.22. :



Ces résultats soulignent l'influence de "l'histoire énergétique" du matériau andique sur ces comportements de rétention d'eau. MAEDA et al. (1977) précisent qu'en plus des deux paramètres succion / teneur en eau, il est essentiel de connaître le niveau de contrainte énergétique préalable imposé à l'échantillon ainsi que ces variations de volume.

On notera que, mis à part dans le profil O5 (1 230 m), les horizons superficiels allophaniques ou à halloysite (A et Aa) ne voient pas leurs propriétés de rétention de l'eau modifiées par séchage à pF 6, leur histoire hydrique peut donc avoir déjà connu ce niveau de contrainte, que l'on considère comme la valeur maximale dans la gamme de variation bioclimatique. Ce niveau n'est vraisemblablement jamais

atteint au-delà de 1 200 m dans l'ouest, où les conditions bioclimatiques naturelles préservent le sol de tout séchage préalable (nébulosité, humidité relative de l'air).

1.3.2. Seuil de dessiccation et modification irréversible du comportement des horizons d'altération

Compte tenu des comportements similaires entre horizons profonds séchés et horizon superficiels, de l'évolution de la fraction organo-minérale sous contrainte, on peut supposer que la dessiccation joue un rôle important dans la différenciation comportementale des horizons. Il s'agit de cerner plus précisément ces processus et nous avons choisi pour cela de travailler sur deux profils : O2 (brunisol andique) et O4 (andosol), de comportement différents et représentatifs des matériaux développés sur cendres des versants ouest et sud.

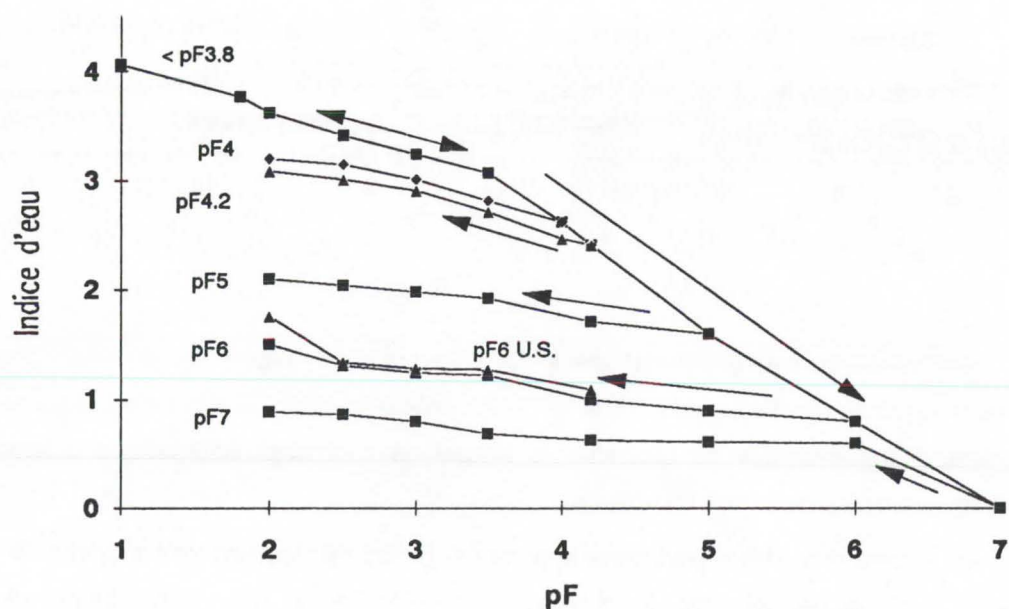
Sur les horizons B et Sa de ces profils, nous avons soumis des échantillons à différents niveaux de contrainte préalable (pressions pneumatiques et équilibres en phase vapeur) avant d'établir pour chacun d'eux la courbe de rétention d'eau, après remise à saturation (TESSIER, 1984).

□ 1 000 m (figure II.23.)

Pour des contraintes préalables atteignant jusqu'à pF 3.8, les courbes obtenues se superposent à la courbe du sol frais (courbe "enveloppe") : la réversibilité du comportement de rétention dans cette gamme de variation de teneur en eau est totale. La courbe indique une porosité de rétention très élevée, largement dominée par la microporosité (vidange très forte après pF 3.5)

Après dessiccation préalable à pF 4.0, le matériau perd de son affinité pour l'eau lors du retour à des potentiels faibles. La courbe en réhumectation après pF 4.2 est très proche de la précédente mais le phénomène s'accroît fortement après séchage à pF 5, pF 6 puis étuvage (point anhydre pF 7).

Figure II.23. Evolution des teneurs en eau en fonction de contraintes préalables : Profil O4, horizon B



Ces résultats sont tout à fait compatibles avec nos observations, et similaires à ceux obtenus par COLMET-DAAGE *et al.* (1965, 1967, 1970). Les approches microstructurales entreprises par ROSELLO (1984) et DENAIX (1989) sur un matériel identique illustrent ces processus de réorganisations microstructurales et retrait irréversible à partir d'un seuil de contrainte. D'après MAEDA et WARKENTIN (1975), ces modifications drastiques du volume poral n'affectent pas la minéralogie et les propriétés interfaciales du matériau.

L'écart significatif entre les courbes obtenues en réhumectation après pF3.8 et pF4.0 permet de cerner le seuil de réversibilité (pour cet horizon O4Sa frais, W% = 98.5 à pF 4.0). Ce seuil d'état hydrique est également celui du recrutement irréversible de la fraction colloïdale en éléments grossiers (chapitre III.3.).

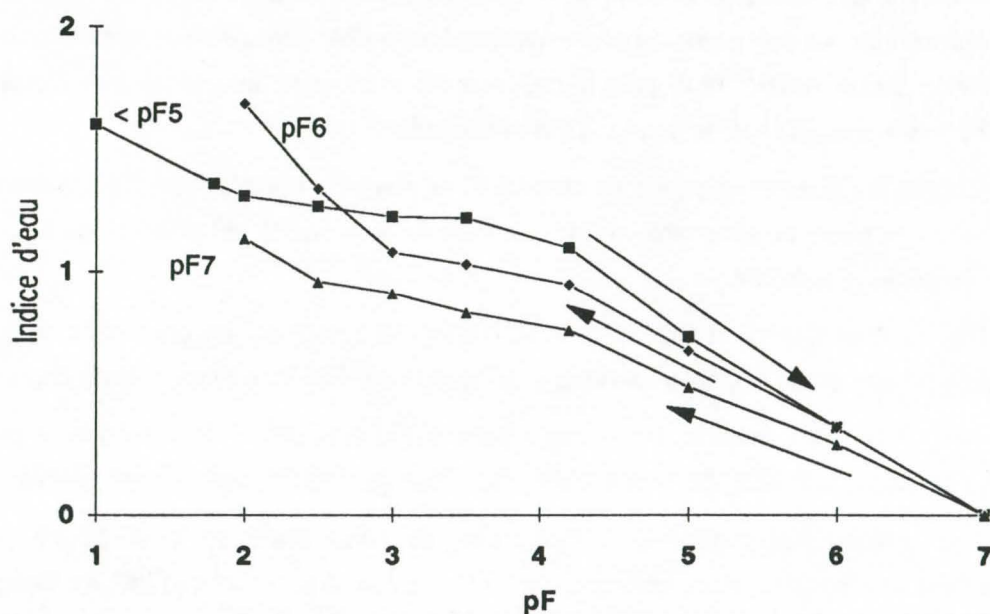
La similitude entre les courbes obtenues en réhumectation après pF 4.0 et pF 4.2 pourrait exprimer un comportement par paliers plutôt qu'une évolution régulière des courbes en fonction des contraintes préalables (familles de courbes). On notera l'écart important entre les courbes en réhumectation à partir de pF 4.2 et pF 5.

Sur du vrac soumis à un séchage préalable correspondant à pF 6, une dispersion énergétique aux ultra-sons est appliquée (120 W, 20 kHz) (Courbe pF 6 U.S. de la figure II.23). On constate une légère augmentation de l'affinité pour l'eau, certainement par une dispersion partielle des structures nouvelles générées par la condensation des gels (pseudo-sables de la littérature, MAEDA et WARKENTIN, 1975 ; KUBOTA, 1972).

□ 620 m (figure II.24.)

Une manipulation similaire effectuée sur le profil O2 (620m) montre que pour toutes les contraintes appliquées jusqu'à pF5.0 inclus , il n'y a pas de modification significative des comportements de rétention : les courbes en réhumectation se superposent à la courbe enveloppe.

Figure II.24. Evolution des teneurs en eau en fonction de contraintes préalables : Profil O2, horizon B



La forme de cette courbe traduit une distribution bimodale des pores : macro-porosité (< pF2) et micro-porosité (> pF4).

Le séchage à pF6 provoque une faible diminution de rétention pour les contraintes élevées, puis une rétention plus forte pour les contraintes faibles. Ce comportement a déjà été observé sur matériau halloysitique, sans que l'on puisse l'expliquer. L'affinité pour l'eau diminue encore après étuvage mais on notera là encore un redressement de la courbe à pF2.0.

□ Discussion

L'affinité pour l'eau de l'horizon B du profil O2 est beaucoup plus faible que celle de l'horizon Sa du profil O4 pour une teneur en colloïdes similaires. Les phénomènes de réorganisation du matériau au cours de la dessiccation sont différents. Si un comportement global peut être cerné (perte progressive de l'affinité pour l'eau après un seuil de contrainte préalable), les valeurs de teneur en eau, la répartition des différentes courbes établies en réhumectation et la valeur du seuil de contrainte préalable semblent dépendre de la nature du matériau, en particulier du taux d'amorphes.

Rappelons que la fraction fine de ces matériaux est constituée principalement d'argiles 1/1: halloysite et kaolinite, d'allophanes dans le brunisol andique, et principalement d'amorphes s-/ et d'halloysite dans l'andosol.

La plupart des types d'argiles ont une affinité pour l'eau dépendante du niveau de dessiccation préalable imposée au matériau (TESSIER, 1984). Sur les sols étudiés, la recharge en eau est faible, après que l'échantillon ait été soumis à une dessiccation au-delà du seuil de réversibilité (aplanissement de la courbe, qui conserve son allure générale). Ce comportement a déjà été observé par GRANJEAN (1983), Van OORT et DOREL (1988) sur sol halloysitique, par TESSIER (1984) sur halloysite pure, mais aussi par COLMET-DAAGE et *al.* (1965, 1967, 1970), par MAEDA et WARKENTIN (1975) sur des matériaux riches en allophanes des Antilles, d'Amérique Latine et du Japon. D'après ces auteurs, les modifications de l'affinité pour l'eau ne dépendent pas de la surface spécifique (qui reste constante après séchage), mais de l'organisation porale qui se modifie lors du séchage. D'après COLMET-DAAGE et *al.* (1970), la forte hydratation des matériaux andiques dépend de l'organisation du réseau de fibres (imogolite, halloysite) et d'agrégats élémentaires, les processus de déshydratation irréversible interviennent lors de l'effondrement de cette organisation après dessiccation poussée. Ces auteurs pensent que le niveau d'organisation est variable et détermine la résistance du matériau à la dessiccation.

D'après les résultats exposés au chapitre III, le matériau halloysitique O2 est moins sensible à la dessiccation que le matériau allophanique O4, et le seuil de réversibilité est diff rent (pF5 au lieu de pF4, soit une taille de pores plus faible).

D'après Van OORT et DOREL (1988), l'halloysite détermine en grande partie les propriétés macroscopiques physiques de ces sols, une forte dessiccation entraîne des modifications importantes :

- au niveau des feuillets, un séchage poussé (au-delà de pF 6) provoque la perte de l'eau interfoliaire; ce passage de l'halloysite 1nm à l'halloysite 0.7nm (métahalloysite) est irréversible,
- au niveau interparticulaire : l'extraction de l'eau entre pF 4 et pF 4.8 provoque un effondrement de la microorganisation, correspondant à la brusque diminution des indices d'eau et de vide ; ce réarrangement serait en grande partie réversible.

1.4. Evolutions simultanées de la teneur en eau et de la porosité

L'évolution des systèmes de porosité est abordée par la mesure du volume et de la teneur en eau de mottes centimétriques, prélevées dans les horizons superficiels A ou Aa et d'altération B ou Sa des profils O1 (380 m), O2 (620 m), O3 (780 m) et O4 (1 000 m). Pour comparer les matériaux entre eux, les résultats sont exprimés en indices d'eau, de vide ou d'air par rapport au volume de solide (unité : $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ de solide).

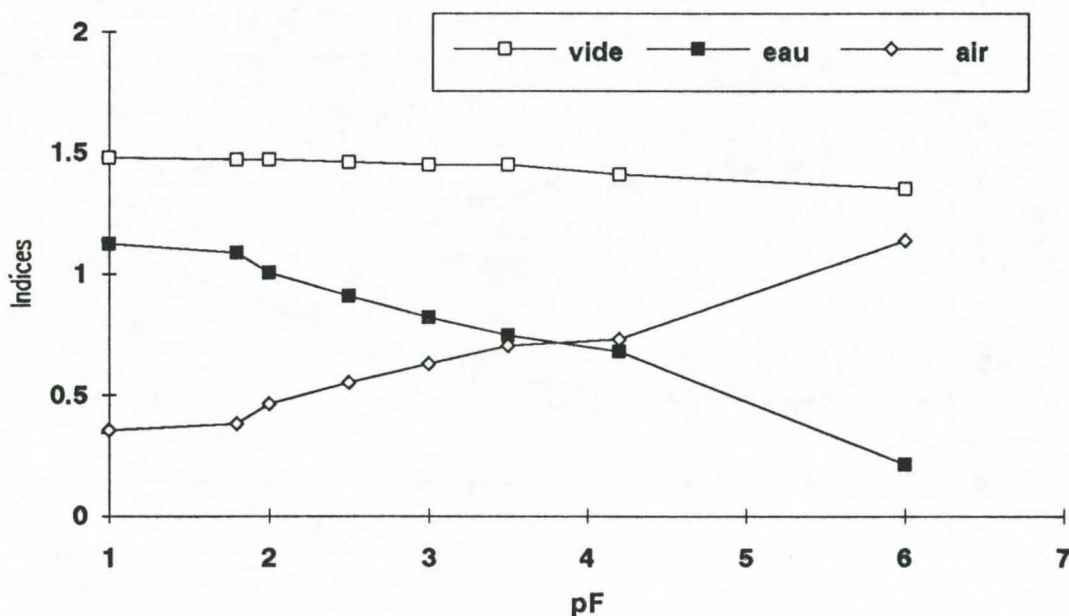
1.4.1. Evolution de l'indice d'eau et de l'indice des vides

□ Profil O1, 380 m, Brunisol (figures II.25)

Dans le sol brun tropical du profil O1, les 2 horizons principaux décrits A et B sont peu différents morphologiquement et du point de vue de leurs comportements.

L'horizon d'altération B est un matériau peu déformable en fonction des contraintes hydriques. Un faible retrait s'opère à partir de pF 3.5. La perte en eau est régulière, signalant une répartition homogène des différentes tailles de pores. On note l'indice d'air qui reste très important aux pF faibles (forte macroporosité inter-agrégats).

Figure II.25. Evolution des indices d'eau, des vides et d'air. Horizon O1 B : Brunisol, 380 m.



□ Profil O2, 620 m, Brunisol andique (figures II.26-27)

L'horizon superficiel A se comporte comme un matériau peu déformable en fonction de son état hydrique. L'indice des vides diminue faiblement jusqu'à pF 4.2, puis se stabilise en deça de ce point.

On peut localiser deux points d'entrée d'air : vers pF 2.5 et pF 4. Ils correspondent à une chute brutale de l'indice d'eau.

Figure II.26. Evolution des indices d'eau, des vides et d'air. Horizon O2 A : Brunisol andique, 620 m.

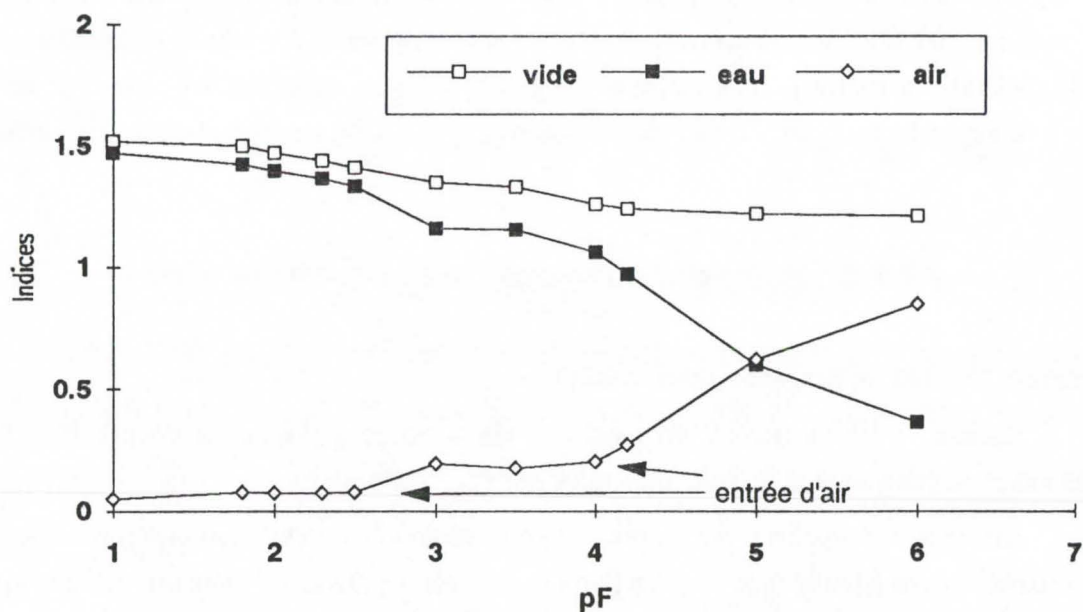
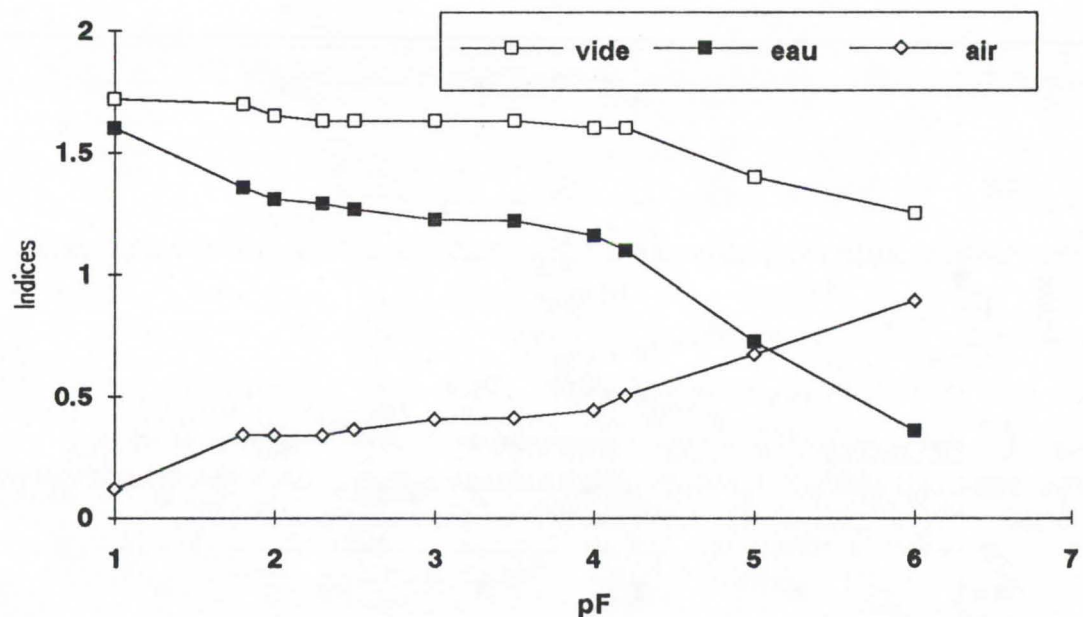


Figure II.27. Evolution des indices d'eau, des vides et d'air. Horizon O2 B : Brunisol andique, 620 m.



L'horizon d'altération B est rigide jusqu'à une contrainte de pF 4.2, puis un retrait s'opère, jusqu'à pF 6 expérimentalement mais sans qu'une limite ne soit atteinte. On ne localise pas nettement de point d'entrée d'air, la vidange plus accentuée de l'eau après pF 4.2 sans retrait important du matériau provoquant une augmentation de l'indice des vides.

Pour ce matériau globalement peu déformable, la distribution porale apparaît bimodale : macroporosité et micro-porosité (vidange forte de l'eau aux faibles suctions et après pF 4), seule la vidange de cette porosité fine provoque un retrait important (et irréversible, chapitre IV.1.3.).

□ Profil O3, 780 m, Andosol (figures II.28-29)

L'indice des vides de l'horizon superficiel Aa diminue jusqu'à pF 4.2, puis le matériau ne se déforme plus à des contraintes hydriques plus élevées.

Figure II.28. Evolution des indices d'eau, des vides et d'air. Horizon O3 Aa : Andosol, 780 m.

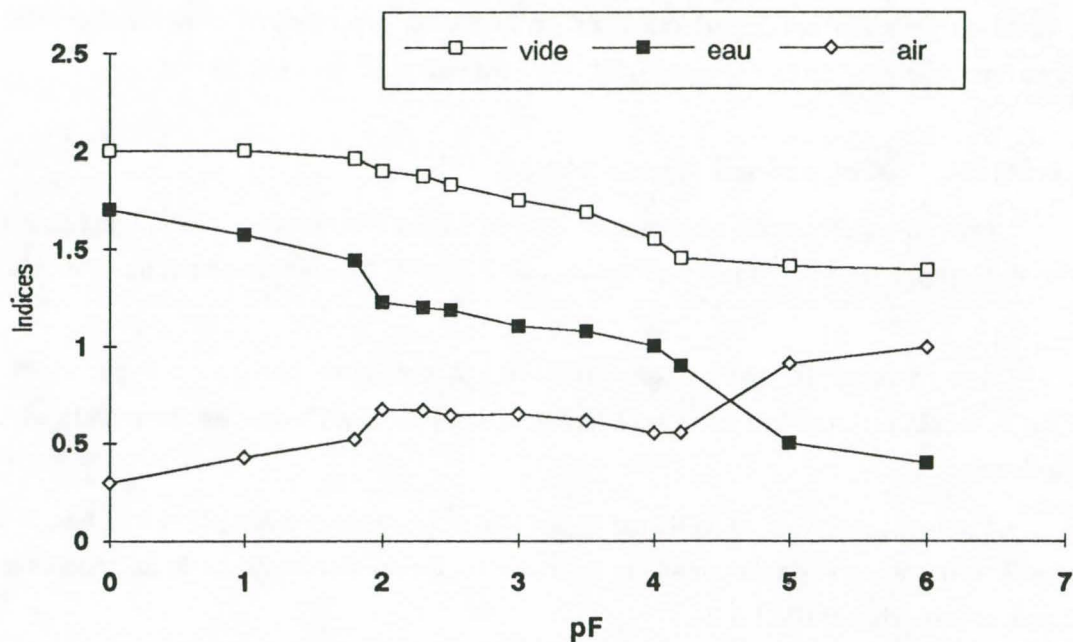
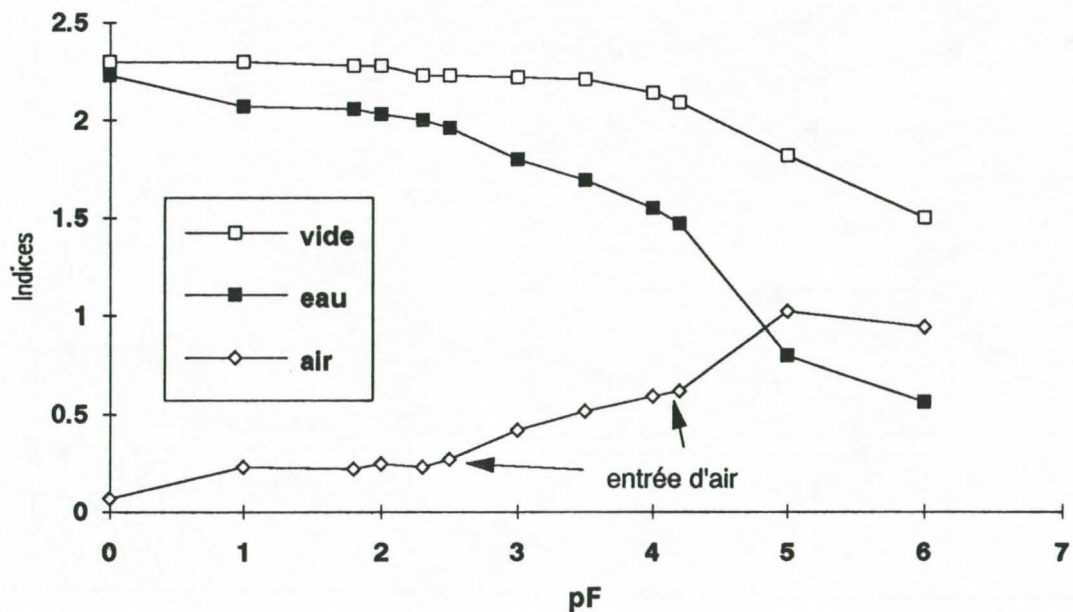


Figure II.29. Evolution des indices d'eau, des vides et d'air. Horizon O3 Sa : Andosol, 780 m.



La perte en eau est progressive, plus brutale entre pF 4 et pF 5, occasionnant une entrée d'air plus nette. La distribution porale apparaît homogène avec 2 pics : aux diamètres de pores équivalents à pF 1.8 - 2 et pF 4 - 5.

Le matériau d'altération Sa se déforme peu jusqu'à pF 3.5, puis une augmentation de masse volumique s'opère jusqu'au point expérimental pF 6. L'entrée de l'air dans le matériau est progressive, sans point particulier, deux inflexions à pF 2.3 et pF 4.2 correspondent à une perte en eau plus importante. La porosité totale de rétention est importante dans ce matériau, elle apparaît largement dominée par une porosité très fine. A la vidange de cette microporosité correspond un retrait important.

□ Profil O4, 1 000 m, Andosol (figures II.30-31)

L'horizon superficiel Aa se comporte comme un matériau sableux rigide, il est peu déformable. L'entrée de l'air est progressive, deux inflexions vers pF 2 et pF 3.5 correspondent à une vidange accentuée de l'eau.

Dans l'horizon Sa, toute augmentation de la contrainte provoque un départ d'eau et une déformation du matériau, jusqu'à la limite expérimentale de pF 6. L'indice d'air est donc peu variable, proche ou supérieur à 1.

La porosité de rétention totale est importante et dominée par des pores très fins, la vidange de cette porosité s'accompagne de déformations du matériau. Seule la vidange de la microporosité provoque un retrait irréversible (chapitre IV.1.3.2.).

Figure II.30. Evolution des indices d'eau, des vides et d'air. Horizon O4 Aa : Andosol, 1 000 m.

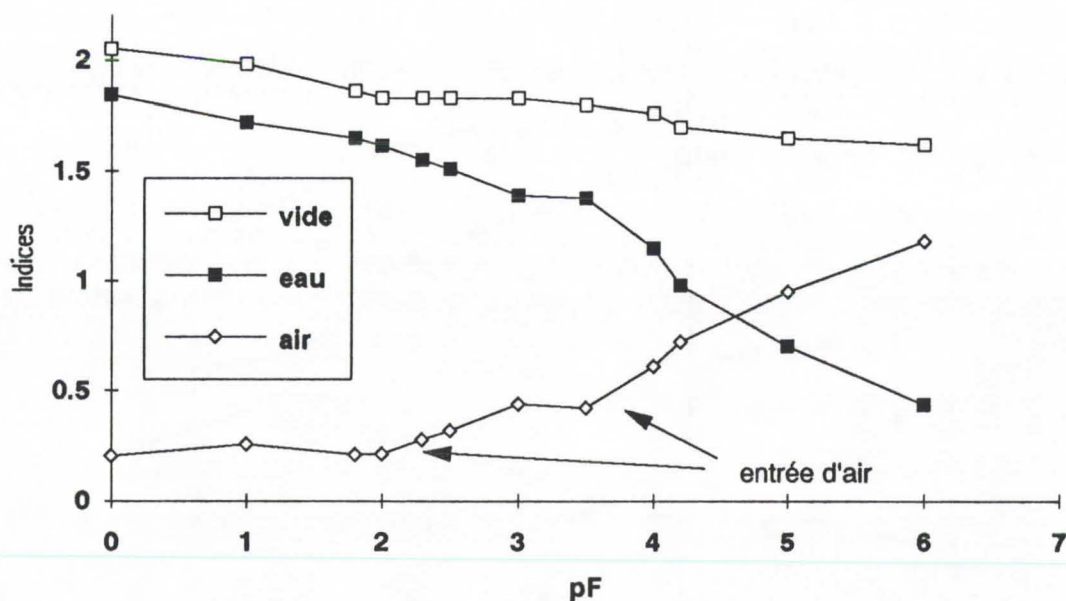
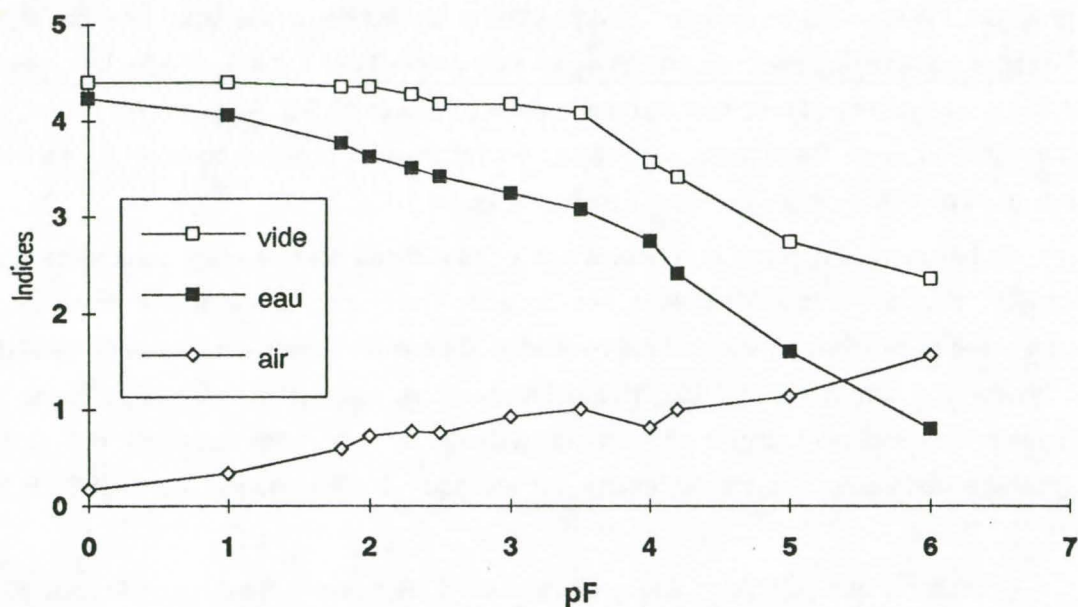


Figure II.31. Evolution des indices d'eau, des vides et d'air. Horizon O4 Sa : Andosol, 1 000 m.



□ Discussion

Les matériaux des profils O2 et O3 sont halloysitiques, avec des taux d'amorphes de l'ordre de 2 à 5%. Le profil O4 est riche en amorphes (12%), en gibbsite et contient de l'halloysite en moindre quantité.

Les résultats obtenus discriminent bien ces profils en fonction de la nature de leurs constituants :

L'halloysite dominante du profil O2 se déforme faiblement en fonction de la contrainte hydrique, lorsqu'elle n'a jamais subi de dessiccation poussée (horizon B), elle ne se rétracte qu'à des contraintes élevées (après pF 4.2). Dans l'horizon superficiel, soumis à des cycles climatiques humectation - dessiccation, l'halloysite déshydratée (parfois qualifiée de métahalloysite ou halloysite à 0.7 μm interfoliaire) se comporte comme un matériau peu déformable (type kaolinite, argile 1/1).

Figure II.32. Valeurs d'indices des vides, de masse volumique apparente et de porosité obtenues à pF2 sur 3 profils (mottes)

Echantillon	e	γ_d	n
O2A	1.47	1.170	0.595
O2B	1.65	1.091	0.623
O3Aa	1.90	0.972	0.655
O3Sa	2.28	0.860	0.695
O4Aa	1.83	0.879	0.647
O4Sa	4.35	0.503	0.813

Dans les andosols, la différence horizon superficiel / horizon profond est encore plus nette, et les capacités de rétraction des horizons profonds frais est spectaculaire, dès que la contrainte atteint pF 3.5 dans le profil O4. Nous avons vu qu'à cette augmentation brutale de masse volumique correspondait une perte irréversible de l'affinité pour l'eau en réhumectation (le seuil défini est à pF 3.8). Les valeurs d'indice des vides avant ce seuil indique un matériau rigide entre pF 2.5 et pF 3.5. Au potentiels faibles, le matériau gonfle en accumulant l'eau. Cette particularité maintient l'indice d'air presque constant sur l'ensemble de la courbe, même à l'approche de la saturation, il reste proche de 1.

Globalement, il apparaît que l'indice des vides diminue constamment dans toute la gamme de succion étudiée pour les échantillons issus des horizons d'altération, sans qu'une limite de retrait soit atteinte : il n'existe pas réellement de porosité résiduelle. Ce comportement est similaire à celui d'une argile gonflante 2/1 de type smectite (TESSIER, 1980). En revanche, pour les horizons superficiels, l'indice des vides diminue progressivement jusqu'à pF 4 environ (vidange de la porosité de retrait), puis reste constant au-delà (porosité résiduelle). Ce comportement est identique à celui observé par TESSIER (1980) sur kaolinite.

On observe que l'état énergétique de l'eau dans les horizons Sa d'andosols reste limité. Sur la saison sèche 1990 et dans les deux profils O3 et O4 (andosols non perhydratés), la succion mesurée est restée en deça de pF 3 à 60 cm de profondeur.

Dans ces sols, le calcul d'une réserve en eau à partir de données expérimentales de teneur en eau en fonction d'état énergétique (courbes pF de laboratoire) est donc irréalisable :

- il convient de connaître la gamme de variation de l'état énergétique de l'eau en place, le point de flétrissement virtuel pF 4.2 n'étant jamais atteint (figure II.15.) ;
- dans la zone superficielle, ce potentiel peut être dépassé, mais l'architecture du matériau est alors modifiée et son affinité pour l'eau diminue.

1.4.2. Courbes de retrait établies sur mottes (figures II.33-34)

L'expression graphique de l'évolution de l'indice des vides en fonction de l'indice d'eau (courbes de retrait) propose une autre vision des mêmes phénomènes, et fournit des renseignements quant à la géométrie et l'évolution de l'espace poral (TESSIER, 1980 ; BRUAND, 1986). Ce mode de représentation est très proche de celui utilisé par les physiciens du sol en matière de retrait : volume massique ($1/\gamma_d$) en fonction de la teneur en eau pondérale W.

On peut en déduire en effet le comportement des différentes classes de pores lorsque l'eau en est extraite. Etablies pour les deux profils O2 et O4, les courbes de retrait discriminent nettement les matériaux dans leur comportement lors de la dessiccation. Les comportements observés confirment les observations réalisées au chapitre précédent d'après les indices des vides :

□ Horizons profonds à halloysite et/ou allophanes

- dans un premier temps, il y a vidange de pores rigides et la géométrie du système est respectée, il y a remplacement isovolumique de l'eau par l'air dans la porosité de remplissage.
- puis un retrait progressif s'opère, légèrement moins important en volume que le départ de l'eau pour le matériau halloysitique, générant une entrée d'air continue. Le matériau apparaît partiellement déformable :

soit parce que l'espace poral correspondant l'est effectivement, soit parce que l'apparition de fissures s'ajoute à une déformation totale intrinsèque qu'elle masque. Dans le matériau allophanique, lors d'une brève phase, la diminution de l'indice des vides est supérieur au volume d'eau extrait : on assiste à la disparition d'une partie des pores précédemment occupés par de l'air. Expérimentalement, ce processus est décelé à un indice d'eau compris entre 2.8 et 3.2, cela correspond à une succion correspondant à pF3.4 à pF4.1, soit une gamme de pores équivalents de diamètre compris entre 0.2 et 1.2 μm .

- pour les deux types de matériaux, la suite de la vidange correspond à une diminution de l'indice des vides inférieure au volume d'eau extrait. Le matériau est partiellement déformable. L'observation morphologique d'andosols en dessiccation indique l'apparition très tardive de fissures, les pores semblent donc se déformer partiellement suite à leur vidange.

Figure II.33. Courbes de retrait établies sur mottes, Profil O2, brunisol andique 620 m.

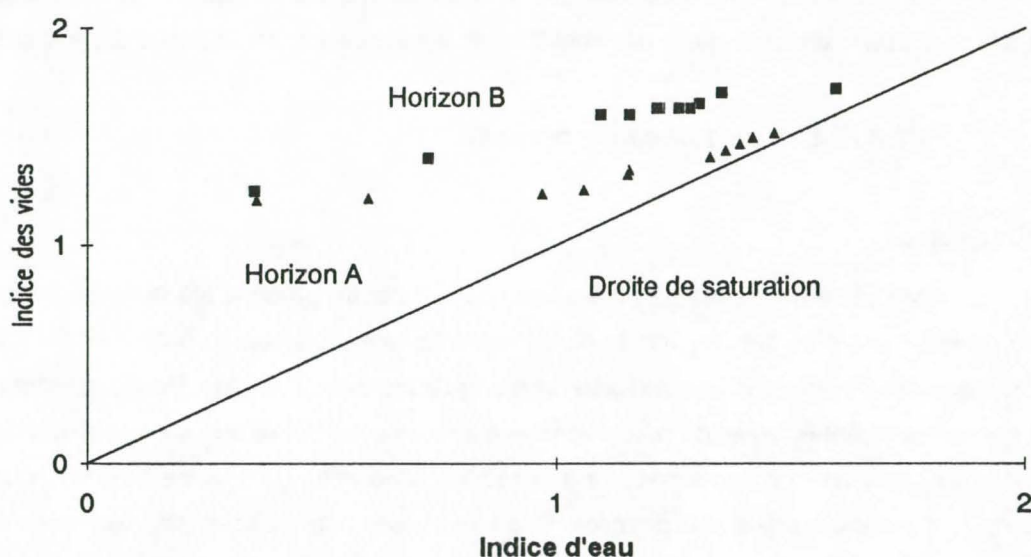
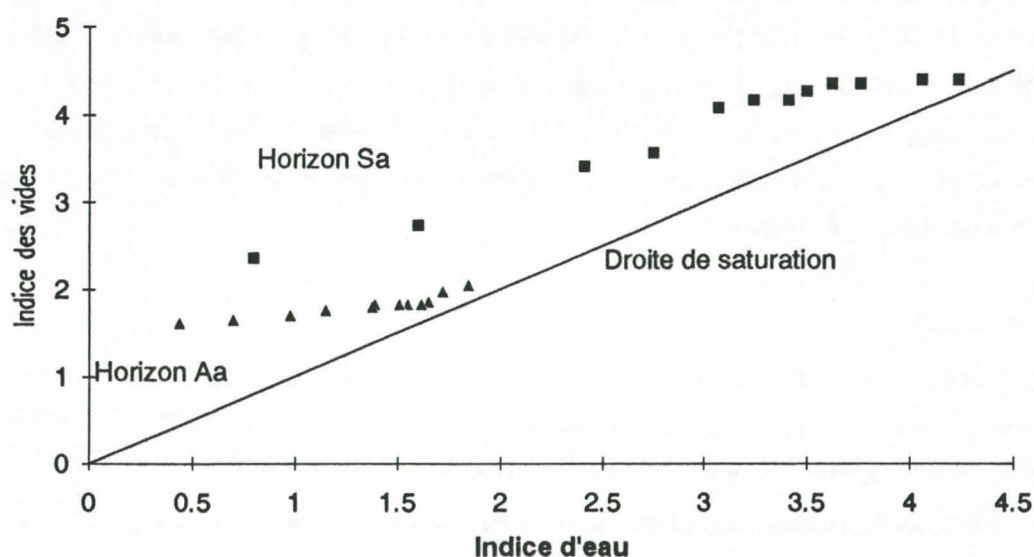


Figure II.34. Courbes de retrait établies sur mottes, Profil O4, andosol 1 000 m.



On voit donc la complexité de comportement de ces matériaux andiques, dont l'espace poral peut être rigide, déformable, ou peut disparaître, selon la taille de pores intéressés par la vidange. On notera que la porosité dite résiduelle (indéformable) n'est pas une réalité dans ces types de matériaux.

☐ Horizons superficiels à halloysite et/ou allophanes

- le matériau subit un retrait dès le début de la vidange, l'entrée d'air est limitée, à la perte en eau correspond un effondrement du matériau, la porosité de remplissage n'existe pas réellement, la porosité de retrait intéresse des tailles de pores importantes,
- puis à partir d'un seuil, le retrait diminue fortement, l'entrée d'air est massive : le matériau ne se déforme que faiblement tout en continuant à perdre de l'eau. Il est presque rigide. On notera qu'aucune limite de retrait (déformation nulle, rigidité totale) n'est jamais atteinte.

Ce comportement peut être assimilé à celui de matériaux rigides (de type sableux), il est conforme à la distribution dimensionnelle des constituants élémentaires, caractérisée dans le chapitre III.

1.4.3. Les systèmes de porosité

☐ Préalables

La distribution des pores de différentes tailles (spectre poral) a été obtenue en considérant la vidange progressive des différents rayons de pores équivalents en fonction du potentiel matriciel imposé au matériau. Cette méthode ne s'applique en toute rigueur qu'à un matériau rigide. Pour l'appliquer, il nous faut supposer que les différentes tailles de pores se vident successivement et que les variations de volume qui s'opèrent lors de cette vidange correspondent à la réduction de cette gamme de porosité, que celle-ci est ensuite inerte lors d'une extraction plus poussée. Ces hypothèses sont fausses d'après les résultats obtenus en retrait (BRUAND, 1986) mais permettent d'obtenir grossièrement des distributions porales et de comparer les matériaux.

ROSELLO (1984) considère que le matériau andique est saturé à pF1 (suction équivalente à une hauteur d'eau de 10 cm), les mesures de teneur en eau sous suction contrôlée (infiltrométrie) indique que l'indice d'eau augmente encore entre pF 1 et la suction nulle. Cela correspond au stockage de l'eau dans les pores de taille supérieure à 300 μm . Expérimentalement, les potentiels les plus faibles (pF 0, pF 1) ont été obtenus *in situ* par humectation du sol en suction contrôlée et mesure gravimétrique de la teneur en eau et de la masse volumique du sol (cylindres). Les données obtenues sur mottes de pF 2 à pF 7 sont exploitées. La porosité totale (ensemble des pores de 0 à 3 mm) est calculée à partir de l'indice de vide obtenu lors de la mesure à saturation.

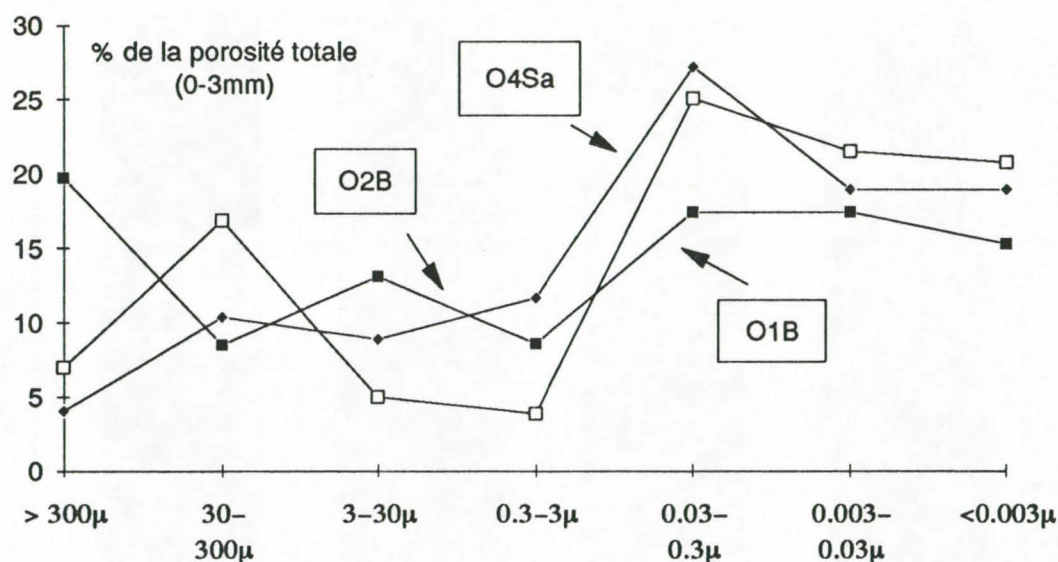
☐ Résultats

Les spectres poraux obtenus (figure II.35.) ont des allures proches, caractérisées par une forte microporosité relative. Ainsi, d'après la classification usuelle (HENIN, 1977) qui sépare micro et macroporosité à 3 μm , on a 76.7% de microporosité pour O4, 71.17% pour O2.

On note cependant l'abondance relative des pores de taille intermédiaire (0.3 à 30 μm) dans le matériau allophanique, alors que le sol halloysitique présente une distribution plutôt bimodale micro /

macropores. Le matériau kaolinitique O1 présente une distribution homogène des tailles de pores. TUNCER et al. (1977) ont pu établir la distribution des tailles de pores par intrusion au mercure sur des échantillons d'andosols à des états hydriques variés, ils montrent que la porosité chute au cours de la dessiccation, que la gamme de pores touchée par le retrait est comprise entre 10 et 0.01 μm . Les macropores et les pores les plus fins ne semblent pas concernés.

Figure II.35 : Distribution volumique des systèmes de porosité



1.5. Relations entre les différents types d'eau et les fractions minérales et organiques

1.5.1. Méthode et résultats

Après calcination à environ 1 100 °C sur un banc à minéralisation I.R., le matériau subit une perte de poids (perte au feu, BAIZE, 1988).

Cette perte regroupe en fait 3 processus distincts, où sont éliminés :

- l'eau de capillarité résiduelle (ER), restante entre le séchage à pF6 et l'étuvage à 105°C,
- la matière organique (MO), par combustion,
- l'eau de constitution (EC) des minéraux argileux et cristallisés à courte distance (gels).

Si les deux premières fractions sont accessibles par d'autres méthodes analytiques, la minéralisation nous permet de connaître la répartition pondérale de l'ensemble, par rapport à la fraction minérale de poids $P_{1100^\circ\text{C}}$.

La perte au feu (PAF) est réalisée après un séchage préalable à l'air (pF 6), constituant le poids initial P_{air} . L'expression est : $\text{PAF} = (P_{\text{air}} - P_{1100^\circ\text{C}}) / P_{\text{air}} \%$.

La teneur en eau est obtenue par étuvage (eau capillaire résiduelle ER). Le taux de matière organique totale (MO) est estimé d'après celle en carbone (MO=1.72C) obtenue par analyse préalable.

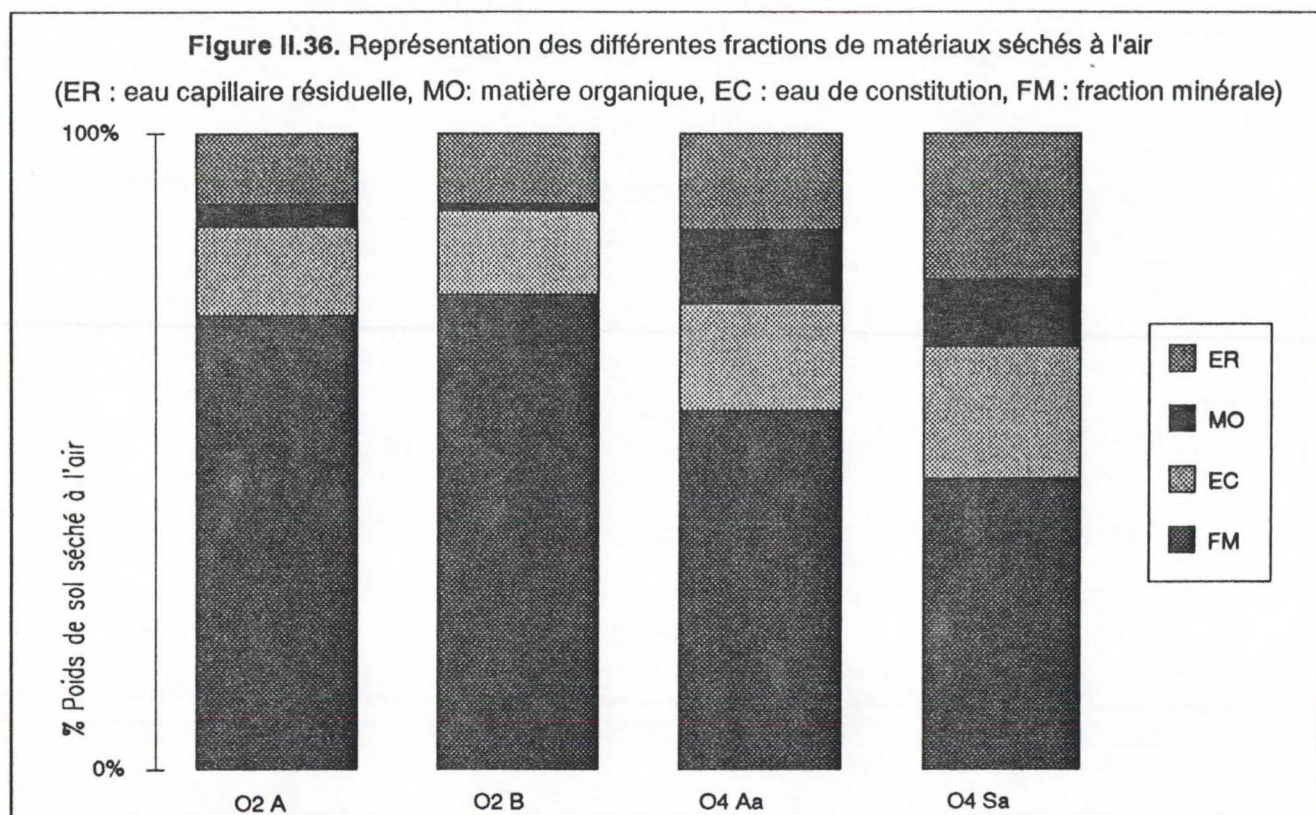
Les résultats obtenus sur les profils O2 (brunisol, 620 m) et O4 (Andosol, 1 000 m) sont :

O2 horizon A : PAF=28.5%

O2 horizon B : PAF=25.2%

O4 horizon Aa : PAF=43.5%

O4 horizon Sa : PAF=54.2%



1.5.2. Discussion

La proportion pondérale d'eau de constitution est de 13.9% pour O2 A et 13.1% pour O2 B, ces valeurs sont cohérentes avec le type de matériau : halloysitique (kaolinite hydratée). Les valeurs obtenues sur andosol sont plus élevées, l'eau de constitution atteignant 16.8% dans l'horizon superficiel Aa et 20.9% dans l'horizon d'altération Sa. Cette eau de constitution (ou eau d'adhésion superficielle -LUC, 1978-) est composée d'eau hygroscopique (couche monomoléculaire discontinue sur les particules) et d'eau pelliculaire (couche multimoléculaire d'épaisseur variable autour des particules). Elle est retenue dans le sol par des forces équivalentes à des pressions supérieures à 10 000 bars (pF 7), elle dépend directement de la surface spécifique du matériau.

Les teneurs en eau (ER) sont encore importantes à pF 6. A ce potentiel, l'eau est retenue dans des pores de diamètre inférieur à 0.003 μm (3 nm), ce qui pourrait correspondre aux pores intra-tubulaires de l'imogolite (1 nm) et intra-sphériques de l'allophane (2 - 3 nm), à l'espace inter-feuillet de l'halloysite (1 nm).

Contrairement aux matériaux argileux dans lesquels la surface spécifique active détermine principalement la rétention de l'eau, c'est la nature chimique des surfaces et le système poral qui détermine la rétention de l'eau dans les matériaux allophaniques (ROUSSEAU et WARKENTIN, 1976). Nous avons

vu qu'une partie de l'eau de rétention capillaire est irréversiblement perdue au cours de dessiccations poussées; à partir de pF 3.8 pour le matériau à allophanes et halloysite, à partir de pF 5 pour le matériau halloysitique, le départ progressif de l'eau détruit les pores vidés (MAEDA et WARKENTIN, 1975 ; ROSELLO, 1984) par un effondrement irréversible du système poral. On peut estimer que cette eau d'état énergétique modéré est en fait déjà une eau de constitution du matériau. Dans le matériau profond en place, les suivis tensiométriques ont montré que ces niveaux énergétiques n'étaient jamais atteints (figure II.15.).

2. Comportement mécanique des matériaux remaniés. Porosités et contraintes mécaniques.

2.1. Consistances et teneurs en eau caractéristiques

2.1.1. Généralités

La répartition des 3 phases, et en particulier la teneur en eau du matériau, détermine sa consistance. Celle-ci induit un comportement sous contrainte mécanique. Les mécaniciens du sol ont défini 3 états caractéristiques (HENIN, 1976 ; COSTET et SANGLERAT, 1981) :

- l'état solide, se caractérise par une rupture sans déformation préalable, les fragments résultant de la rupture ne se ressoudent pas par pétrissage,
- l'état plastique, se caractérise par une déformation sans rupture et sans variation de volume du matériau, qui reste en l'état de déformation et peut se ressouder par pétrissage,
- l'état liquide, se caractérise par l'absence de rigidité, toute déformation est annulée sous le propre poids du système qui tend vers une lame infiniment mince horizontale.

A ces états parfaits s'ajoutent des états intermédiaires, les agronomes parlent en particulier d'état friable, entre solide et plastique, qui se caractérise par une rupture avec déformation modérée préalable et possibilité de ressouder les fragments pétris.

ATTERBERG puis CASAGRANDE (cités par HENIN, 1976 ; COSTET et SANGLERAT, 1981), ont défini des tests pour connaître les teneurs en eau de passage d'un état à l'autre (dites limites d'Atterberg) : limite de liquidité W_L , limite de plasticité W_P . On détermine un indice de plasticité : $I_p = W_L - W_P$.

Ces tests sont normalisés (Modes Opératoires du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Anonyme, 1970) et permettent de comparer les matériaux entre eux. Les résultats obtenus peuvent être interprétés au plan de la géométrie du système : entre W_L et W_P (plage plastique), les sorties et entrées d'eau s'accompagnent de variation de volume du matériau.

La limite de retrait W_R pourrait constituer le passage entre l'état friable et l'état solide (DUCREUX, 1984), en-deçà de cette limite, le matériau est rigide et les mouvements d'eau ne modifient pas le volume total du système.

L'ensemble des manipulations porte sur le matériau préalablement tamisé à 400 μm (mortier). Nous ne détaillerons pas les protocoles, abondamment et précisément décrits dans la littérature. Rappelons que les énergies mises en jeu pour chacune de ces manipulations sont différentes, de l'ordre de 2 kJ/m³ (FAURE, 1978) pour la détermination de la limite de liquidité (chutes répétées de la coupelle de Casagrande), certainement un peu au-delà (sans précision) pour les déterminations des limites de plasticité (malaxage manuel d'un rouleau de terre) ou de retrait (élimination des bulles d'air dans les coupelles par chocs). FAURE (1978) a montré que le comportement du matériau dépendait du niveau de contrainte appliqué. Il propose d'exploiter les courbes de sensibilité au tassement (chapitre IV.2.2) pour définir par niveau d'énergie, des plages de consistance. On notera que celles-ci dépendent en outre de différents

facteurs : distribution dimensionnelle des particules (texture, taux de colloïdes), la nature minéralogique des particules (type de colloïdes), la nature des cations adsorbés sur les colloïdes, le taux de matière organique.

Agronomes et agromachinistes exploitent ces tests, initialement destinés au génie civil, pour évaluer d'une part le comportement du matériau sous l'action des machines (outils de travail du sol, roues des engins...) connaissant sa teneur en eau, d'autre part pour définir les conditions et limites de traficabilité des terres, choisir les outils, optimiser techniquement et économiquement les interventions...

2.1.2. Limites d'Atterberg : liquidité et plasticité

❑ Résultats obtenus sur la séquence ouest

Les échantillons issus des profils de la séquence ouest ont été traités soit maintenus à leur humidité de prélèvement, soit préalablement soumis à une dessiccation correspondant à pF 6 (séchage à l'air prolongé).

Le tableau II.37. réunit l'ensemble des résultats obtenus sur les profils étudiés, et à titre de comparaison, sur des matériaux divers (sol ferrallitique, kaolin) et sur des matériaux purs (d'après HENIN, 1977 pour les argiles 1/1 ; BIRRELL, 1952, pour l'allophane).

Tableau II.37. Limites d'Atterberg et limites de retrait des horizons issus de nos profils et de matériaux purs

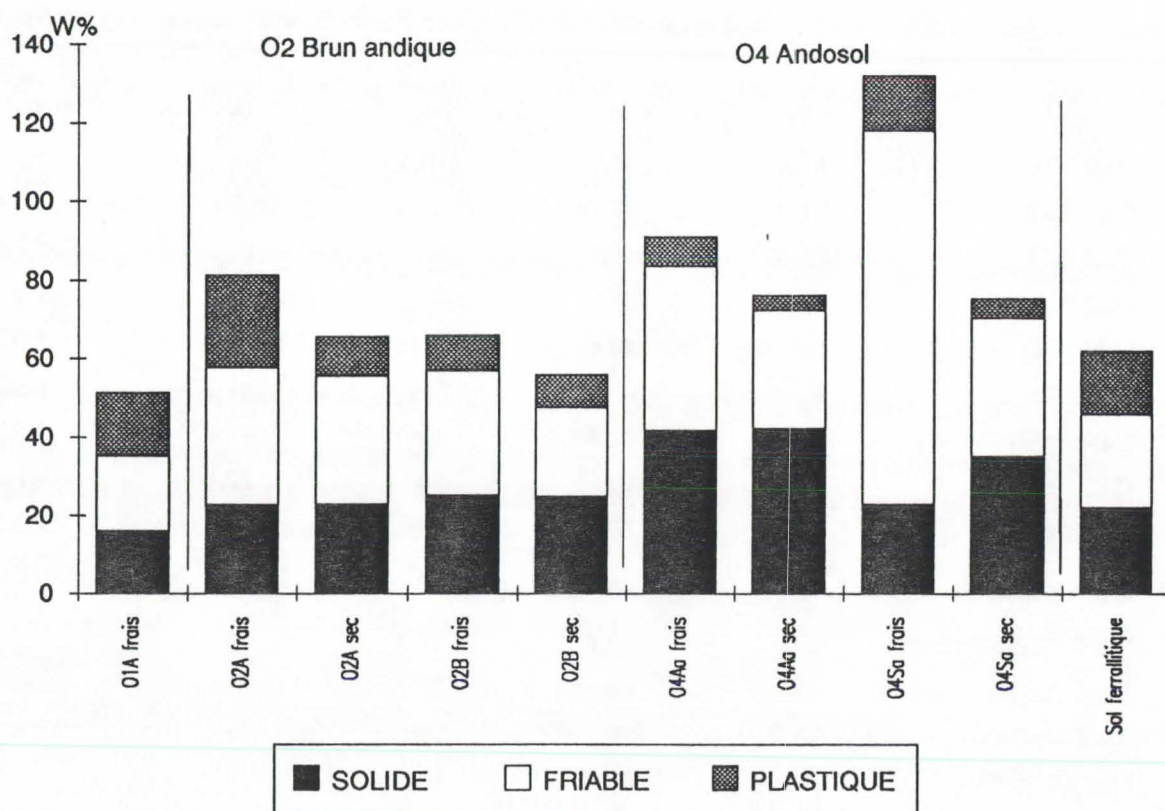
	W_L	W_P	I_P	W_R	γ_d à W_R
O1A frais	51.4	35.3	16.1	15.8	1.96
O2A frais	81.3	57.7	23.6	22.6	1.73
O2A pF6	65.6	55.7	9.9	22.7	1.72
O2B frais	65.9	56.9	9	24.8	1.71
O2B pF6	56	47.6	8.4	25.1	1.67
O4Aa frais	91	83.6	7.4	41.7	1.26
O4Aa pF6	76.2	72.4	3.8	42.2	1.26
O4Sa frais	132	118	14	22.8	1.63
O4Sa pF6	75.2	70.4	4.9	35	1.21
Sol ferrallitique	62	46	16	22	-
Kaolin (commercial)	56.5	38.8	17.7	30.9	-
Kaolinite Ca	73	36	37	-	-
Kaolinite Na	52	26	26	-	-
Halloysite Ca	54	38	16	-	-
Halloysite Na	36	29	7	-	-
Allophane frais	231	136	95	-	-
Allophane séché à l'air	85	78	7	-	-

□ Discussion, cohérence des résultats avec d'autres situations, avec d'autres propriétés

Les limites de plasticité et de liquidité des matériaux andiques étudiés sont élevées, l'intervalle plastique est très faible. Compte tenu de la limite de retrait, l'intervalle friable est très important, en particulier sur matériau O4Sa frais, conférant aux outils agricoles une relative et théorique facilité de travail. La fugacité de l'état plastique et les teneurs en eau *in situ* toujours très proches de la marge supérieure de cette gamme génèrent en fait des problèmes de portance et de glissement. L'ensemble des limites et leur évolution sont cohérentes avec les données obtenues sur halloysite pure (HENIN, 1977), l'allophane pur a des limites beaucoup plus élevées (BIRRELL, 1952), très réduites après séchage. Ces résultats concordent avec la constitution minéralogique des sols étudiés : halloysite dominante pour O2, halloysite et allophanes pour O4.

Sur les matériaux andiques étudiés, le séchage à pF 6 provoque toujours une baisse importante et irréversible de W_L et de I_p . Les plages de consistance plastique et surtout friable sont donc réduites. L'indice de plasticité I_p devient insignifiant dans les horizons du profil O4 soumis à pF 6 (figure II.38.). Le matériau atteint un état non plastique. Ce comportement traduit les modifications structurales étudiées au chapitre III : le séchage préalable réduit la part de mortier (< 400 μm) du matériau, l'objet même de la mesure des limites n'est donc pas identique.

Figure II.38. : Plages de consistance exprimées en teneur en eau pondérale W%, selon le type d'horizon et le séchage préalable.



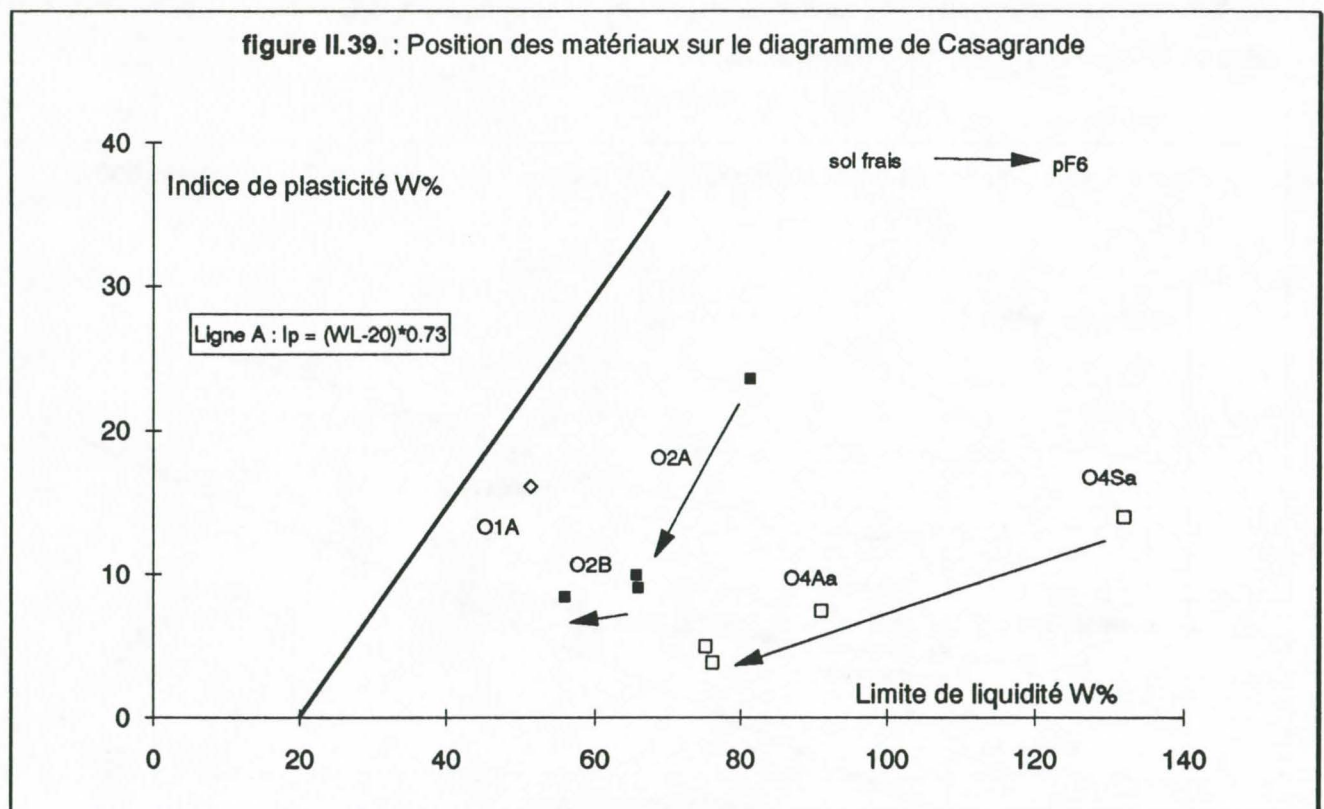
La distribution des matériaux sur le diagramme de Casagrande (figure II.39.) est conforme aux observations faites par WESLEY (1973), TUNCER et al. (1977) et ROSELLO (1984) sur des matériaux

similaires : les sols à kaolinite (O1) sont très proches de la ligne A de référence définie par la fonction $I_p = (W_L - 20) * 0.73$.

Cette référence est utilisée pour classer les sols selon leurs propriétés géotechniques. Les sols à halloysite et les andosols (à allophanes) sont situés en dessous. L'ensemble des matériaux se situe au-delà de la ligne $W_L=50\%$, ce qui les classe d'après le diagramme de Casagrande en "limons minéraux de haute compressibilité ou argiles organiques" pour leurs propriétés mécaniques.

Sur andosols, SOMA et MAEDA (1974, cités par MAEDA *et al.*, 1977) ont montré que la limite de liquidité mesurée diminue à partir d'un seuil de séchage préalable ($W=100\%$) identique au seuil de modification de la limite de retrait.

Il faut noter que la fugacité de l'état plastique, mise en évidence par les limites d'Atterberg, a été traduite par les pédologues par le terme de thixotropie pour rendre compte de quelques particularités tactiles du matériau andique : par exemple l'aptitude de mottes friables à passer à l'état liquide en exprimant de l'eau sous contrainte modérée (malaxage), puis à reprendre rapidement un aspect solide au repos (LOZET et MATHIEU, 1986).



2.1.3. Retrait du sol remanié : limite et courbe

Effectuée sur du mortier remanié et malaxé, la manipulation visant à définir la limite où la courbe de retrait fournit des résultats qui ne reflètent pas l'évolution réelle du matériau *in situ*; de plus, dans les matériaux non rigides et d'après la procédure de calcul qui ignore le retrait résiduel, la limite de retrait mesurée est une donnée virtuelle, jamais atteinte dans la réalité. Ces résultats permettent cependant de cerner certains processus de réorganisation sous contrainte hydrique, liés à la nature minéralogique de la fraction fine (TESSIER, 1980) et à sa micro-organisation.

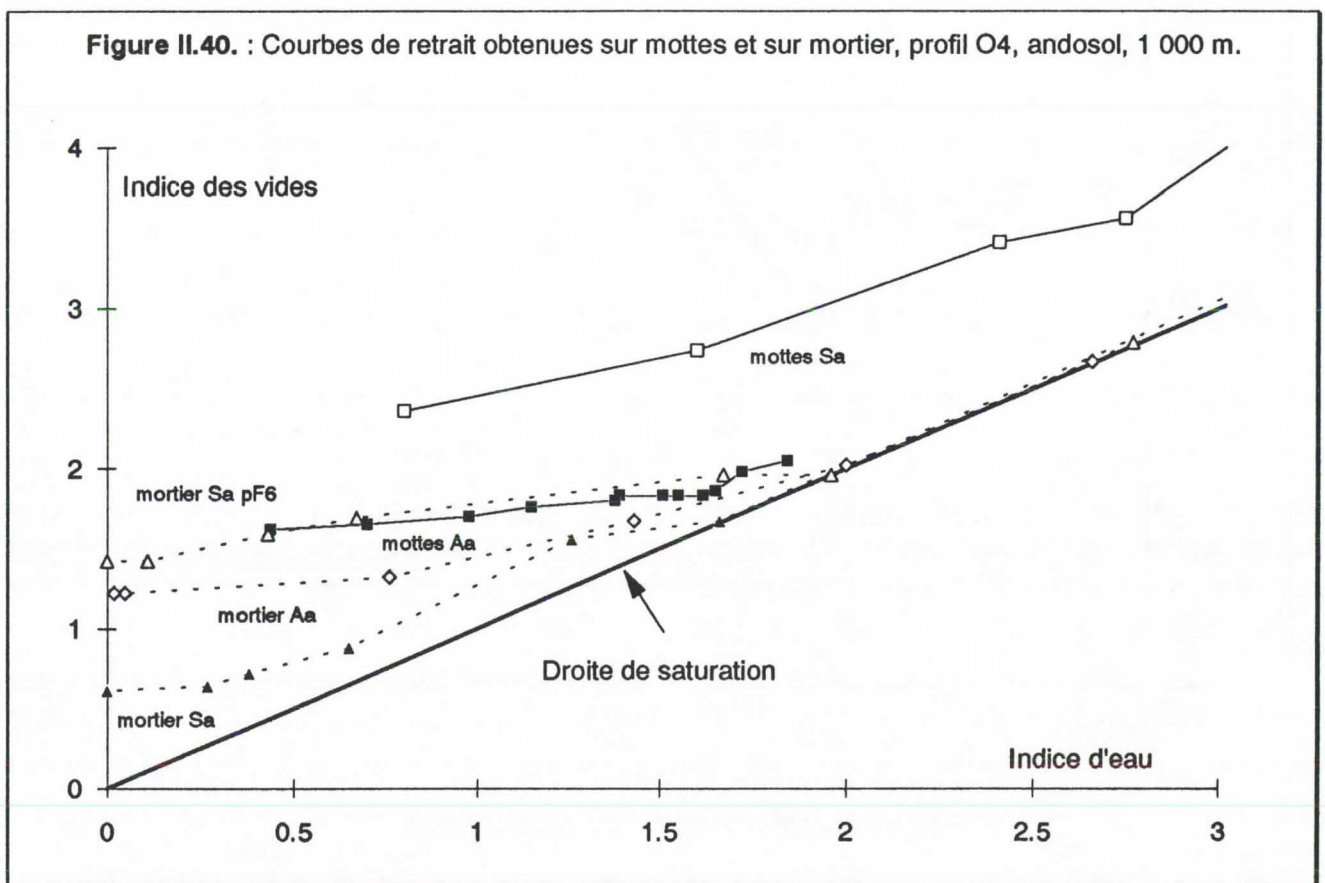
□ Résultats

Les limites de retrait déterminées ne varient pas en fonction du séchage préalable sur les matériaux à halloysite et sur l'horizon andique superficiel. Elles sont assez élevées dans ce dernier cas, et témoignent d'un comportement très peu déformable du matériau. La limite de retrait augmente après séchage dans l'horizon andique d'altération : le matériau perd de sa capacité de retrait après séchage préalable.

Les valeurs de masse volumique apparente γ_d atteintes à la limite de retrait sur matériau andique O4 de surface ou de profondeur préalablement séché sont de l'ordre de 1.21 à 1.26. Cette valeur atteignait 1.63 pour le matériau profond non séché. Après séchage expérimental ou naturel, la taille des particules augmente (condensation des gels, chapitre III.2.) et la largeur des pores résiduels existants à la limite de retrait est plus importante, la masse volumique obtenue est donc plus faible. Selon le même processus, la limite de retrait est obtenue à des contraintes hydriques plus faibles, et donc à des teneurs en eau plus élevées.

En plus de la seule valeur de limite de retrait, il est possible de procéder à la mesure du volume de l'échantillon pendant la dessiccation : des courbes de retrait sont obtenues. Pour les comparer aux courbes construites sur mottes et pour s'affranchir des poids spécifiques γ_s différents, on exprime l'indice des vides en fonction de l'indice d'eau (figure II.40.).

Figure II.40. : Courbes de retrait obtenues sur mottes et sur mortier, profil O4, andosol, 1 000 m.



Obtenu sur structures construites, l'indice des vides prend en compte les porosités texturale et structurale ; il s'agit d'un indice des vides total (au sens de STENGEL, 1979; 1990). Sur mortier, il s'agit d'un indice de vides textural.

Dans l'horizon andique profond Sa, on observe une nette différence entre le retrait de mottes intactes de sol (pourtant d'aspect massif et sans pores visibles) et le matériau tamisé à 400 μm , malaxé, tassé en coupelle (mortier) : l'indice des vides est largement supérieur dans les mottes à indice d'eau égal, l'entrée d'air y est beaucoup plus tardive. Ce phénomène est beaucoup moins marqué dans l'horizon Aa.

L'horizon andique superficiel Aa et le mortier préalablement séché à l'air Sa ont des comportements très proches.

□ Discussion

Divers auteurs ont montré que la structure macroscopique continue de la matrice andique (massive et sans porosité nette visible à l'oeil) semblait en fait constituée de structures élémentaires construites à partir du pool de colloïdes amorphes et de matière organique (HETIER, 1975 ; MAEDA et al., 1977 ; ROSELLO, 1984 ; DENAIX, 1989; voir chapitre III.2.). Les résultats obtenus concernant l'évolution volumique du matériau sous contrainte hydrique confirment ces observations et soulignent deux processus distincts :

- dans les structures construites (mottes), ces niveaux d'organisation sont préservés, la largeur des pores résiduels existants lors du retrait est importante, l'indice des vides total diminue régulièrement en fonction de la perte en eau,

- un tamisage sous eau puis un malaxage (mortier) conduit à la destruction de ces structures, le matériau devient alors très sensible à la perte en eau, la matrice fine se réorganise sans ménager de pores importants, l'indice des vides textural diminue fortement lors de la vidange et jusqu'aux teneurs en eau les plus faibles,

- le séchage préalable du mortier avant retrait provoque la mobilisation de la fraction fine en particules grossières (processus décrit et mesuré au chapitre III), le réarrangement lors du séchage ne sera plus optimum, le retrait est moindre, l'entrée d'air est plus précoce, l'indice des vides évolue peu ensuite lors de la vidange.

Si l'organisation complexe et hiérarchisée imaginée par ROSELLO (1984) reste hypothétique et dépendant de fortes contraintes hydriques, la présence d'un niveau d'organisation de base semble confirmée (agrégat élémentaire de HETIER (1975) de 5 à 10 μm de diamètre ; domaine de MAEDA et al. (1977) de 0.01 à 1 μm ; nanoagrégat élémentaire de ROSELLO (1984) et DENAIX (1989) de 0.1 à 1 μm).

La grande fragilité de cette "crypto-agrégation" est en outre mise en évidence. On retrouve l'idée de thixotropie émise pour traduire les sensations tactiles ressenties au pétrissage.

Au plan des comportements mécaniques, il apparaît que la dessiccation est un facteur essentiel de la différenciation fonctionnelle et morphologique des horizons andiques d'altération Sa.

2.2. Test de compactage : évolution du système poral sous contrainte mécanique

2.2.1. Généralités

□ Principes

Cette manipulation vise à étudier au laboratoire l'influence de l'énergie de compactage et de la teneur en eau initiale du matériau sur sa masse volumique apparente sèche ; autrement dit, sur la répartition des 3 phases. Ce test initialement utilisé par le génie civil et routier américain (American Association of State Highways Officials, PROCTOR, 1933; cités par COSTET et SANGLERAT, 1981) met en oeuvre des énergies élevées (entre 530 et 2 710 kJ/m³). Ce protocole comporte un étuvage préalable du matériau à 60 °C ou un séchage à l'air.

On compacte l'échantillon en plusieurs couches dans un moule de volume connu, avec une énergie cinétique fournie par la chute d'une dame (ou mouton) de poids déterminé, d'une hauteur constante. Après compactage, on détermine (par étuvage et gravimétrie) la teneur en eau pondérale et la masse volumique apparente sèche de l'éprouvette réalisée. Les couples $W - \gamma_d$ obtenus permettent d'établir une courbe dite Proctor, caractéristique de la sensibilité au compactage d'un matériau pour une énergie donnée.

Si l'on modifie l'énergie de compactage en faisant varier le nombre de coups de mouton, son poids ou sa hauteur de chute, on obtient une famille de courbes qui constituent le diagramme Proctor complet, traduisant les possibilités des engins de compactage existants.

□ La courbe de sensibilité au compactage

Aux faibles teneurs en eau pondérale W , le matériau est peu sensible aux effets du compactage : la masse volumique apparente sèche n'augmente pas en fonction de l'augmentation d'humidité initiale (elle peut même diminuer en présence d'argiles gonflantes). A partir d'un seuil caractéristique, le matériau se déforme, sa porosité diminue sous la contrainte appliquée, la masse volumique apparente γ_d sèche augmente jusqu'à un maximum, correspondant à une teneur en eau optimale. FAURE (1978) considère que le matériau est à la consistance plastique dans cette plage de teneur en eau.

Au-delà, on se trouve en présence d'un fluide incompressible (boue biphasée), la masse volumique décroît en fonction du volume d'eau introduit, la courbe devient tangente asymptotiquement à une courbe enveloppe d'équation :

$$\gamma_d = 1/(W + 1/\gamma_s) \quad (\gamma_s \text{ étant la masse volumique du solide})$$

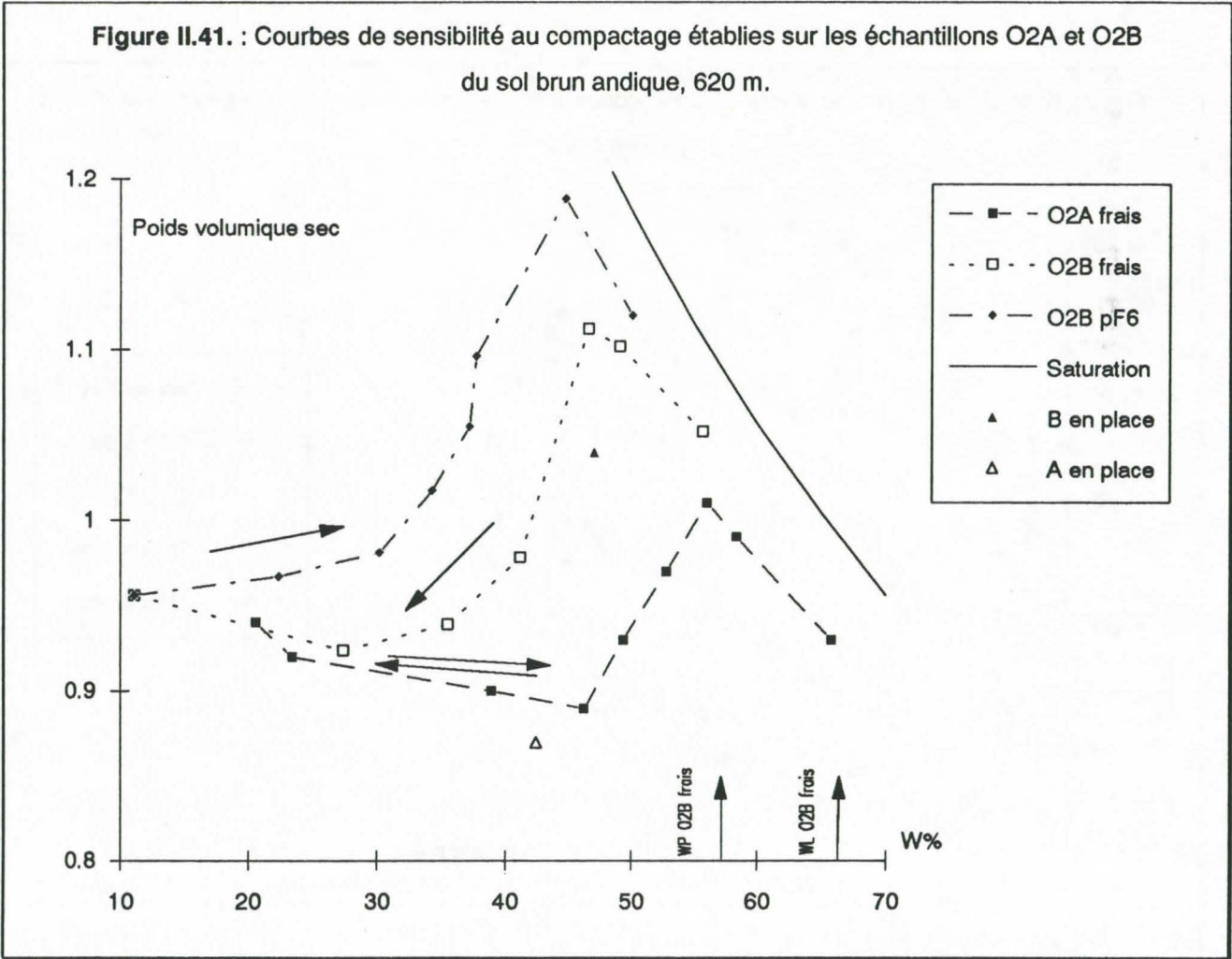
qui correspond à la saturation en eau, elle coupe l'axe des ordonnées à la masse volumique du solide ($\gamma_d = \gamma_s$), état représentant le matériau hypothétiquement monophasé (porosité nulle). Dans cette plage de teneur en eau, le matériau est à la consistance liquide.

L'adaptation de ce test à des sols et à des énergies agricoles est plus récente (FAURE et FIES, 1972 ; MANIERE, 1973 ; FAURE, 1978) : si le moule Proctor original de 950cm³ est généralement conservé, la gamme de teneur en eau est étendue, l'énergie utilisée est réduite.

Si l'on peut proposer des plages de consistance liées à l'énergie de compactage développée, il devient très pertinent de définir les énergies mises en jeu par différentes machines ou niveaux de mécanisation. Ainsi MANIERE (1973) utilise une énergie de 101 kJ/m³, compatible avec certains niveaux de mécanisation en viticulture, DUCREUX (1984) utilise une énergie de 70 kJ/m³ sur des sols d'Afrique de l'ouest à faible niveau de mécanisation.

SIEGMUND et DUCREUX (1982) ont mesuré *in-situ* des couples $W - \gamma_d$ obtenus sous chantier de récolte de canne à sucre intégralement mécanisée à la Réunion. Un calage au laboratoire avec des courbes de sensibilité au compactage établies sur le même matériau a permis de déterminer expérimentalement l'énergie de compactage proche de celle mise en jeu au champ : 140 kJ/m³, soit un compactage réalisé en 3 couches, dans le moule, avec une dame de 1 105 g, tombant de 18.6 cm en 22 coups par couches. Compte tenu du niveau de mécanisation agricole atteint à La Réunion, cette énergie représente virtuellement le risque maximum de compactage possible. C'est le niveau d'énergie qui sera mis en oeuvre lors des tests de compactage réalisés sur nos échantillons : 4 horizons ont subi le test. Les horizons superficiel Aa et profond Sa de l'andosol O4 situé à 1 000 m d'altitude, les horizons superficiel A et profond B du sol brun andique O2 situé à 600 m d'altitude.

Figure II.41. : Courbes de sensibilité au compactage établies sur les échantillons O2A et O2B du sol brun andique, 620 m.



2.2.2. Procédure expérimentale et résultats

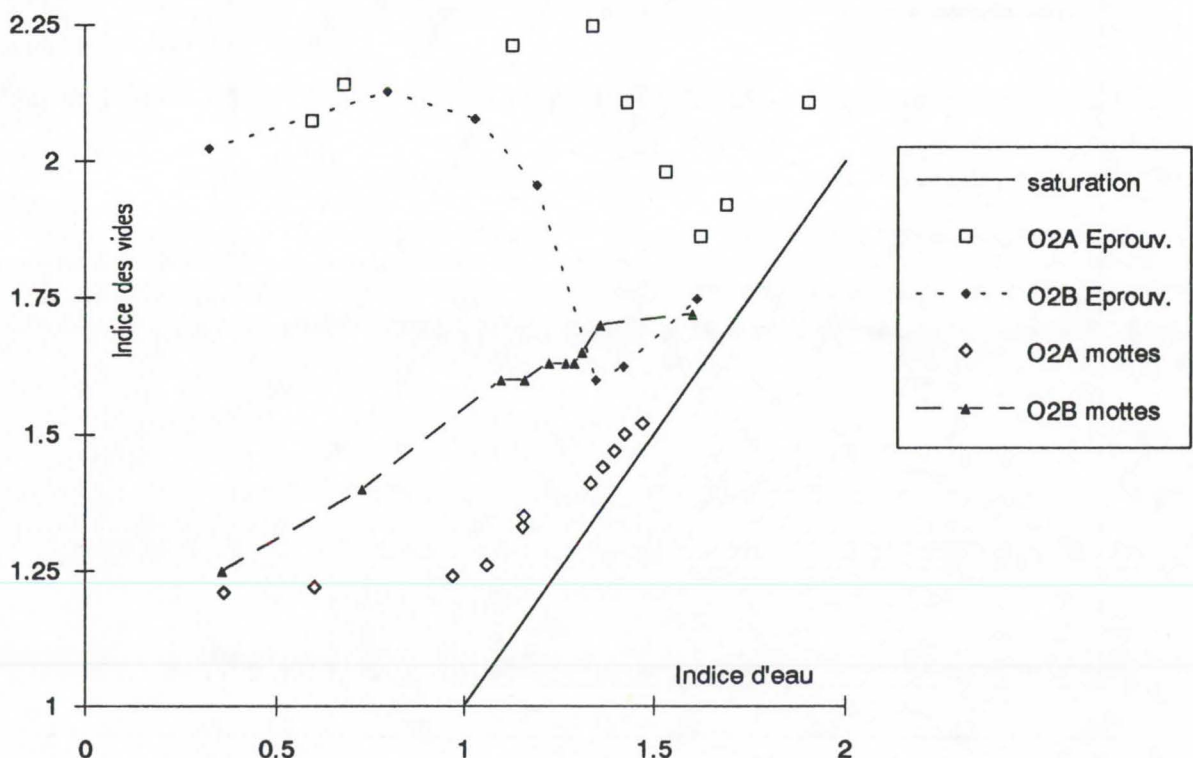
Le sol tamisé frais à 5 mm est mis à sécher à l'air de façon homogène, des prélèvements successifs sont effectués régulièrement afin d'établir les points de la courbe en dessiccation. Pour chacun de ces points, une réhumectation est réalisée sur 2 ou 3 échantillons pour contrôler la réversibilité du comportement.

□ Sol brun andique O2, 620 m

L'étagement des courbes obtenues (figure II.41.) pour le profil O2 résulte de deux processus :

- le séchage prolongé à l'air (pF 6) du matériau O2B provoque les modifications texturales décrites précédemment : une partie du pool colloïdal est mobilisé en limons. La courbe obtenue après séchage atteint des valeurs de γ_d supérieures, conformes à la diminution des valeurs de limites W_L et W_P . On notera cependant que la position de ces limites sur la courbe de sensibilité au compactage n'est pas très cohérente et résulte de la différence d'énergie mise en oeuvre dans les deux types de manipulations. L'augmentation de poids volumique sec peut résulter d'un réarrangement plus optimisé des particules (modification des paramètres des lois d'arrangement des grains, FIES, 1971) ou d'une réduction intime de la porosité dans la matrice colloïdale.

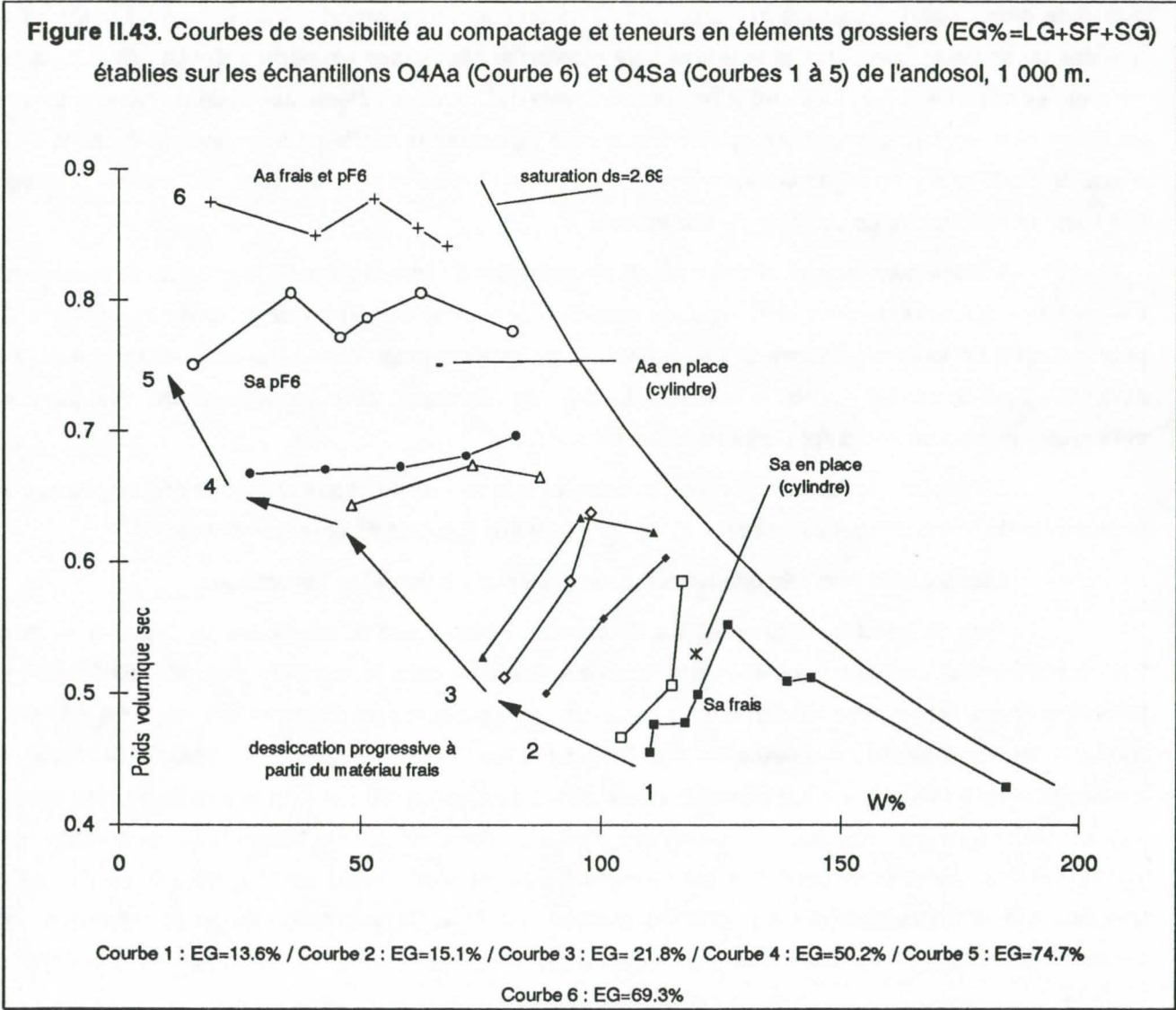
Figure II.42. Espace poral et teneur en eau : comparaison entre éprouvettes compactées et mottes, Profil O2



- les courbes obtenues avec le matériau O2A frais ou séché sont identiques. Les valeurs de γ_d sont inférieures à celles obtenues avec le matériau profond. On sait qu'un taux de matière organique plus élevé (en l'occurrence 4.3% contre 2.24%) protège efficacement le matériau contre la compaction (MANIERE, 1973 ; METTAUER *et al.* 1983, cités par CHAMAYOU et LEGROS, 1989)

L'évolution de l'espace poral en fonction de la teneur en eau sous contrainte de compactage peut être exprimée comme les courbes de retrait sous forme d'indices (figure II.42.) et comparée aux résultats obtenus sur mottes. On observe que "l'effacement de l'histoire du matériau" (FAURE, 1978) par tamisage préalable modifie considérablement les relations espace poral / teneur en eau : malgré la contrainte mécanique appliquée, l'espace poral reste plus important pour les éprouvettes compactées que pour des mottes de sol en place. Ceci est particulièrement net dans l'échantillon O2A.

Pour l'horizon profond O2B, dans une plage de teneur en eau voisine de l'optimum de compactage, l'espace poral du sol remanié devient inférieur à l'espace poral de mottes.



□ Andosol O4, 1 000 m

Le matériau O4Sa frais traité en dessiccation progressive présente une courbe de sensibilité au compactage originale (figure II.43.) : après le pic caractéristique de la courbe (passage de l'état liquide à l'état plastique et à partir duquel la courbe s'éloigne de la courbe de saturation) la courbe descend brièvement.

Dans cette gamme de teneur en eau, toute réhumectation permet un retour selon la courbe initiale obtenue en dessèchement.

Ensuite, la dessiccation plus poussée s'accompagne d'une augmentation régulière de masse volumique sèche et la réhumectation du sol dans cette partie permet de construire de nouvelles courbes, aplanies et réparties entre la courbe-base établie en dessiccation et la courbe-enveloppe de saturation. Le seuil de réversibilité se situerait entre $W\%=100$ et 110.

Dans la zone de forte teneur en eau, la forme de la courbe-base souligne le passage rapide de l'état liquide à l'état friable, elle est compatible avec les limites d'Atterberg mesurées malgré la grande différence d'énergie appliquée (figure II.37.). Les courbes obtenues après dessiccation poussée rappellent la similitude entre matériau andique et matériau sableux au plan des comportements mécaniques. On notera que des poids volumiques secs plus élevés sont obtenus sur le matériau superficiel O4Aa, par ailleurs non sensible au séchage à l'air. La distribution dimensionnelle des particules élémentaires de cet horizon se prête peut-être plus à un réarrangement optimum que celle très orientée sur le pôle sableux de l'horizon O4Sa séché à pF 6 (lois d'arrangement des grains, FIES, 1971), ceci malgré un taux de matière organique supérieur et susceptible de protéger du tassement.

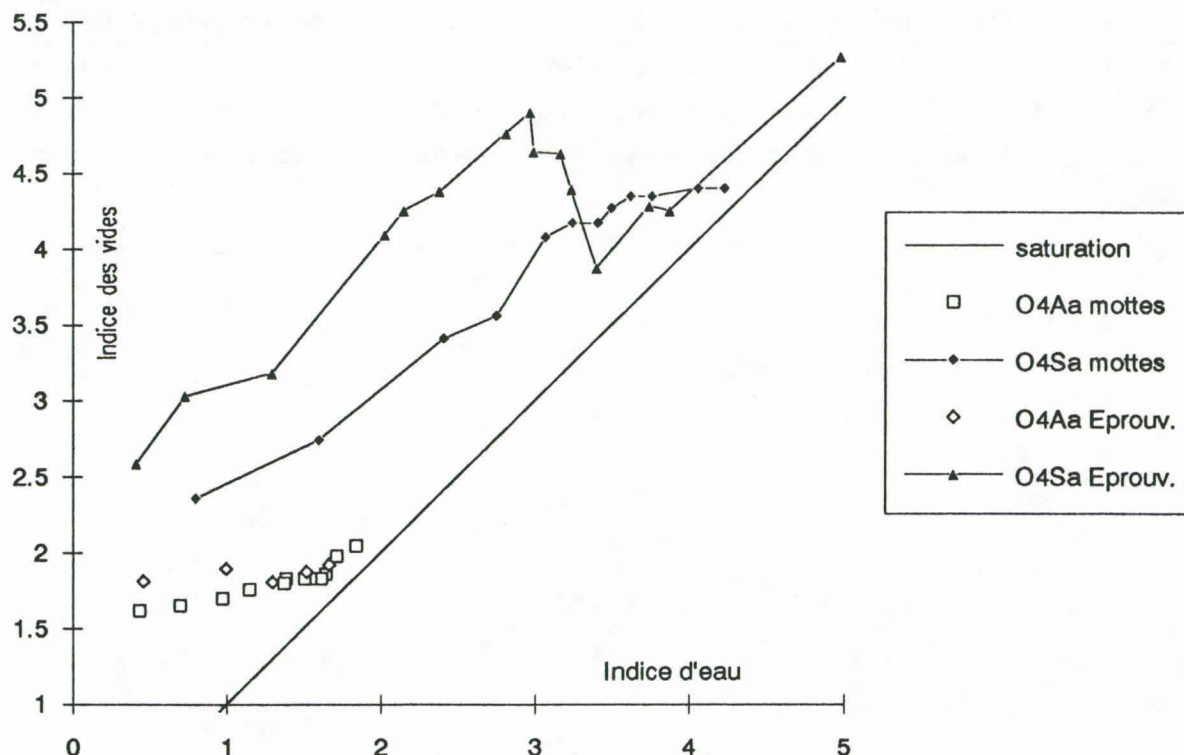
L'étagement progressif des courbes de sensibilité au compactage en fonction de la dessiccation est conforme à l'évolution granulométrique du matériau : la somme des éléments grossiers EG, somme des pourcentages de limons grossiers et des sables, augmente progressivement. Le seuil déterminé pour le matériau d'altération (pF 4, soit environ $W\%=100$) est identique pour l'ensemble des manipulations effectuées en prenant en compte l'état hydrique initial.

L'évolution de l'espace poral en fonction de la teneur en eau sous contrainte de compactage est exprimée sous forme d'indices (figure II.44.) et comparée aux résultats obtenus sur mottes.

Les résultats sont très différents de ceux obtenus sur matériau halloysitique.

Pour le matériau superficiel, les éprouvettes compactées et les mottes de l'horizon en place sont comparables. L'espace poral est beaucoup plus important dans le matériau profond. Aux teneurs en eau importantes, l'éprouvette est sensible au compactage, son espace poral encore très élevé est inférieur à celui des mottes. Aux faibles teneurs en eau, l'espace ménagé entre les grains de l'éprouvette soumise à contrainte reste très supérieur à la porosité intra-motte. L'évolution quasi parallèle des deux courbes indique que le matériau ne présente pas une sensibilité accrue au compactage aux faibles teneurs en eau : l'état hydrique détermine la distribution des grains stables élémentaires étudiée au chapitre 2.3. La diminution spectaculaire et irréversible d'une part de la porosité gouverne l'augmentation du poids volumique sec, certainement de façon prépondérante par rapport à un réarrangement des grains dans ces conditions de faible teneur en eau (réarrangement traduit par la légère convergence des deux courbes aux teneurs en eau les plus faibles). Les résultats obtenus confirment ceux de MAEDA et al. (1983), qui montrent que le matériau andique est inerte et insensible à la compaction sous un seuil d'humidité, ces auteurs montrent que l'accroissement de masse volumique aux faibles teneurs en eau est identique sous compactage ou en soumettant le matériau en vrac à un tassement vibratoire.

Figure II.44. Espace poral et teneur en eau : comparaison entre éprouvettes compactées et mottes, Profil O4



2.3. Conclusion

Les comportements mécaniques des sols à halloysite et des sols à allophanes étudiés sont clairement différenciés, originaux et confirment les observations de WESLEY (1973) sur des latosols et andosols d'Indonésie, de MAEDA et *al.* (1983) sur des sols volcaniques du Japon, et complètent les données obtenues par VAKSMANN (1987) et WEYLAND (1990) sur la limite de retrait d'andosols locaux : ces propriétés sont gouvernées par la distribution granulométrique des particules élémentaires et son évolution sous contrainte hydrique.

On peut les résumer comme suit :

- les limites d'Atterberg sont élevées, les indices de plasticité faibles,
- la limite de retrait calculée est une valeur théorique, jamais atteinte sur du matériau frais,
- le séchage préalable provoque une diminution de ces limites, le matériau perd encore de sa plasticité,
- la sensibilité au compactage *sensu stricto* est faible, l'évolution de l'espace poral étant gouverné par l'état hydrique plutôt que par la contrainte mécanique.

Le matériau halloysitique présente un comportement globalement intermédiaire entre des sols tropicaux (brunifiés ou ferralitiques) et les sols à allophanes dominants. Les horizons profonds présentent une forte réactivité, fonction de l'état hydrique de manipulation (à partir d'un seuil). Les horizons superficiels halloysitiques sont inertes.

On notera que les données obtenues avec les tests sur sol remanié sont valorisées par une interprétation conjointe avec des données obtenues sur des structures construites préservées (mottes). On montre ainsi l'existence d'une organisation de base fragile dans le matériau allophanique profond en comparant l'évolution de l'espace poral en fonction de la teneur en eau, en dessiccation (courbes de retrait). Les matériaux étudiés sont peu sensibles au compactage et dans une plage de teneur en eau très réduite, la diminution de l'espace poral étant gouvernée principalement par la disparition de la microporosité vidangée. Le matériau superficiel et le matériau profond séché sont inertes vis-a-vis du compactage appliqué.

V. Conclusion à la deuxième partie

L'étude conduite sur les séquences de sols développés sur cendres volcaniques de l'île de La Réunion, et plus particulièrement sur deux matériaux modèles, halloysitique et allophanique (profils O2 et O4), a permis de les resituer par rapport aux références obtenues sur d'autres sites de la zone inter-tropicale. Le regroupement fonctionnel au plan physique sous le terme global de sols andiques est validé par l'ensemble de résultats obtenus sur les différents matériaux. On observe cependant une gradation des comportements, liée principalement à leur nature minéralogique et donc à la position altitudinale des faciès, qui détermine la pluviométrie.

Les fortes différences de comportement observés entre les matériaux à halloysite et les matériaux à halloysite et allophanes /-s soulignent l'importance de la teneur en amorphes (figure I.3.). Celle-ci est de 2 à 3% dans les sols bruns andiques (O2, 600 m) et de 10 à 12% dans les andosols non perhydratés (O4, 1 000 m). Le fond minéralogique de ces matériaux étant par ailleurs très proche et principalement constitué d'halloysite et de gibbsite.

Pour les matériaux andiques, le terme d'architecture semble le mieux adapté pour rendre compte à la fois des caractéristiques dimensionnelles de la phase solide et de son organisation, fortement interactives avec des propriétés physiques évolutives, les notions de texture et de structure apparaissant réductrices ou trop partielles, sans limite nette entre elles.

L'étude analytique des caractéristiques physiques de sols andiques montre que l'histoire énergétique (les contraintes hydriques) des matériaux à halloysite et à allophanes détermine en premier lieu cette architecture : caractéristiques dimensionnelles des éléments de la phase solide, espace poral ménagé par leur organisation. Elle gouverne directement les propriétés physiques macroscopiques : affinité pour l'eau, comportements mécaniques.

Des lois identiques régissent l'évolution de cette architecture et des propriétés qui en découlent : jusqu'à un seuil de contrainte, le matériau conserve sa texture initiale, les propriétés physiques macroscopiques (espace poral) peuvent évoluer en fonction des contraintes hydriques ou mécaniques mais sont réversibles. Au-delà de ce seuil, l'architecture du matériau évolue de façon progressive et irréversible pour chaque nouvelle contrainte atteinte.

Le seuil énergétique est évalué à pF6 pour le matériau halloysitique, à pF4 pour le matériau allophanique.

□ Granulométrie des particules élémentaires : la phase solide

Au plan méthodologique, l'étude de la granulométrie des particules élémentaires stables a montré l'intérêt de dissocier et de sérier les problèmes métrologiques, d'adapter les protocoles existants.

Les protocoles standards de granulométrie ne permettent ni la dispersion chimique correcte, ni l'appréhension de la micro-agrégation, pour les sols andiques étudiés, et certainement au-delà pour les sols tropicaux à minéraux amorphes, oxydes et hydroxydes.

La détermination des classes dimensionnelles des éléments minéraux élémentaires est utile pour séparer la fraction colloïdale en vue d'études minéralogiques, mais elle occulte la réalité de terrain : rôle

important des fortes teneurs en M.O., propriétés physiques et appréciation texturale sans rapport avec les résultats obtenus. De plus, l'intérêt prédictif classique de l'analyse granulométrique (BAIZE, 1988) n'existe pas sur matériau andique. Elle constitue en revanche un marqueur de l'histoire énergétique du matériau.

Le protocole proposé permet de quantifier la distribution des particules élémentaires stables (dans les conditions de manipulation) des matériaux, qui ne sont pas seulement constitués d'éléments minéraux purs (colloïdes et cristaux) mais également de matière organique et d'éléments structuraux stables et complexes. Les données obtenues concordent avec les propriétés physiques mesurées.

□ Propriétés physiques, l'eau et l'espace poral : les phases fluides

L'étude de l'espace poral des horizons a consisté à suivre des échantillons soumis à différents niveaux de contrainte préalable puis réhydratés. On suit simultanément la teneur en eau et le volume apparent de mottes lors d'une dessiccation progressive, il est alors possible de discuter la dynamique de l'espace poral en fonction de l'état d'hydratation et de l'histoire énergétique du matériau (BRUAND, 1986).

La réactivité des sols andiques est ainsi mise en évidence, forte pour les matériaux allophaniques, un peu moindre pour les matériaux halloysitiques : l'espace poral subit des modifications spectaculaires lorsque l'état d'hydratation varie. Ces modifications sont irréversibles au-delà de seuils de contrainte. Les résultats obtenus sont en accord avec les processus d'évolution de la phase solide, et avec les observations réalisées sur matériau superficiel naturellement exposé à des contraintes hydriques climatiques.

L'affinité pour l'eau est importante, liée à la nature minéralogique des matériaux et en interaction avec l'espace poral : l'évolution de la teneur en eau peut modifier considérablement la porosité et, au-delà d'un seuil, provoquer la disparition définitive d'une partie des pores vidangés. En retour, cette réduction de l'espace poral entraîne une baisse de l'affinité pour l'eau sans que la minéralogie et les propriétés de surface n'aient été altérées. Ces processus sont caractéristiques des matériaux à gels "amorphes" (condensation en xérogels -MAEDA et WARKENTIN, 1975- ou peptisation -QUANTIN, 1972-) mais existent également dans les sols à halloysite 10A dominante (passage à un faciès déshydraté : halloysite 7A ou métahalloysite).

Des différences notables sont observées entre horizon profond d'altération et horizon superficiel. Ceux-ci ont déjà subi des cycles de dessiccation avancée et présentent des caractéristiques hydriques et porales que l'on observe sur du matériau profond séché expérimentalement.

La gamme de contraintes expérimentales appliquées est étendue (pF 1 à pF 6), les matériaux superficiels doivent subir *in situ* ces contraintes, fonction des cycles bioclimatiques. Les matériaux profonds en place sont en revanche protégés. L'étude de leur évolution sous contraintes élevées est cependant essentielle puisque l'anthropisation du milieu entraîne leur affleurement continu (décapage superficiel par érosion hydrique) ou ponctuel (remaniement, mélange et remontée de matériaux profonds dans l'horizon cultural par les opérations d'aménagement et de préparation des substrats).

L'action orogénique du bioclimat a donc différencié les grands faciès pédogénétiques observés. De plus, il semble donc jouer un rôle prédominant dans la différenciation comportementale des horizons d'un même profil, son action étant exacerbée par l'anthropisation du substrat : travail du sol et sarclage, décapage.

□ Organisation des phases sous contraintes mécaniques

L'étude de la répartition des phases sur sol remanié soumis à des contraintes mécaniques montre une faible réactivité de celui-ci, son architecture étant largement dépendante de l'état hydrique. Des différences importantes sont observées par rapport aux résultats obtenus sur structures construites. La mise en relation des deux échelles d'observation apparaît intéressante, en particulier pour évaluer la sensibilité au tassement du matériau.

En conclusion, il reste à vérifier la validité, au champ et dans les horizons culturels, des trajets granulométriques observés sur le matériau remanié, à en étudier les implications agronomiques et les conséquences sur l'érosion. Il apparaît nécessaire de vérifier à une échelle de mesure supérieure, les relations espace poral / potentiel de l'eau / teneur en eau, en prenant en compte l'anthropisation. Les limites de consistance définies permettront d'illustrer des comportements observés au champ sous travail du sol.

L'ensemble est développé en troisième partie.

**Troisième partie : Etude expérimentale *in situ*
des horizons cultureux :
Etats structuraux
et processus générateurs d'érosion,
Interactions milieu - opérations culturelles - plantes**

I. Introduction

Dans la seconde partie de ce travail, la caractérisation physique et l'évolution des matériaux andiques sous contraintes ont été abordées. Il convient d'étudier au champ les implications des fonctionnements décrits, en particulier pour les horizons superficiels dont les caractéristiques interagissent avec les conditions de mise en culture, influencent les comportements des peuplements végétaux et la pérennité des systèmes de culture, menacés par l'érosion pluviale intense et une baisse de l'aptitude culturelle du milieu.

Compte tenu de la forte réactivité des matériaux, soulignée par cette étude préalable, la mise en culture des substrats andiques semble provoquer des modifications importantes des horizons superficiels : modifications directes par les opérations culturales de préparation du sol ; modifications indirectes par l'érosion pluviale.

La mise en culture des sols accélère l'évolution des horizons superficiels, au-delà de considérations pédogénétiques, car les contraintes sont exacerbées : agression du climat et évolution de l'état hydrique, remaniements et mélanges occasionnés par les outils, passage d'engins agricoles, colonisation et activité racinaire sont autant de facteurs qui modifient la répartition des phases du sol, la circulation des fluides et l'organisation structurale. Le matériau andique d'altitude semble particulièrement sensible à cette anthropisation, en raison de sa forte réactivité intrinsèque, en raison des possibilités d'évolution irréversible de ses caractéristiques physiques macroscopiques sous contraintes hydriques poussées, en raison enfin de l'environnement "à risques" du système de culture à base de plantes sarclées (géranium, maïs, haricot, tabac...) : pentes, faiblesse des dispositifs anti-érosifs, sensibilisation limitée de la profession agricole au problème de l'érosion, mécanisation inadaptée ...

Les sols andiques de plus faible altitude (sols halloysitiques entre 500 et 700 m dans l'ouest, entre 200 et 500 m dans le sud) s'intègrent au système cannier, le matériau est moins exposé à l'érosion, les objectifs de ce système sont autres (augmentation de productivité de la terre et du travail, intensification, alternatives à la canne à sucre...). Cette troisième partie est donc consacrée aux andosols désaturés.

Divers aspects de la mise en culture sont abordés, scindés en deux problématiques : les effets et les moyens :

- Etat structural, déterminisme, évolution, et interactions avec les processus générateurs de ruissellement et d'érosion pluviale,
- La préparation du sol, mécanisée ou non, ses interactions avec le milieu et ses implications agronomiques.

Les états structuraux superficiels et leur évolution semblent déterminants pour expliquer les processus de ruissellement, ils sont étudiés, ainsi que les fonctionnements hydrodynamiques des horizons culturaux. On situera à l'échelle parcellaire les paramètres de répartition des phases du sol, étudiés dans la seconde partie, en prenant en compte plus particulièrement leurs variabilités spatiale et temporelle, selon différents itinéraires techniques. Les observations préalables réalisées concernant les itinéraires de préparation des andosols sont exposées, étayées de quelques résultats. Une recherche méthodologique est conduite pour étudier les interactions sol - plante puis matériau andique - outil - cellule motrice au champ.

II. Comportement structural et hydrodynamique des horizons superficiels, implications dans les processus d'érosion

1. Introduction

1.1. L'érosion pluviale dans les systèmes de culture sur andosols

L'érosion *lato-sensu* recouvre tous les processus physiques, chimiques et anthropiques qui concourent dans un premier temps à la désagrégation, à l'altération des roches affleurantes et dans un second temps au transport des produits de différentes natures issus de ces processus. L'érosion des reliefs est un processus inéluctable, particulièrement actif à la Réunion, du fait de la géomorphologie et du climat : effondrements, glissements, ravinements, mais également ruissellement superficiel intense sur les sols.

HESENTAL (1987) rappelle en un tableau synthétique les paramètres et facteurs de l'érosion associés aux risques climatiques, pédologiques, anthropiques (figure III.1.).

Au plan agricole, cette dégradation des substrats est spectaculaire et dépend principalement des conditions de mise en culture et des mesures protectrices associées (GUENNELON, 1955; RAUNET, 1991). Elle comporte divers aspects : diminution de l'épaisseur de sol cultivable, diminution de sa fertilité, menaces pour les infrastructures (routes, habitations) et pour l'environnement (lagon et écosystème récifal).

Dans les systèmes de culture intégrant la production fourragère, l'érosion est principalement liée aux phases d'amélioration foncière (défrichement) et de préparation du sol avant semis des prairies. Dans le système de culture à base de géranium, associant des cultures à cycle court, l'érosion est un processus permanent, favorisé par les pratiques culturales traditionnelles de lutte contre l'enherbement (sarclage) et la concomitance d'opérations à risques (travail du sol, récolte de pomme de terre...) et de précipitations cycloniques (janvier à mars) ou orageuses de fin de saison des pluies (avril-mai).

Concernant l'érosion des sols agricoles, NEBOIT (1983) souligne l'importance de l'action anthropique et synthétise l'ensemble des interactions en jeu : agrosystèmes - potentiel érosif des sols - risques climatiques (figure III.2.).

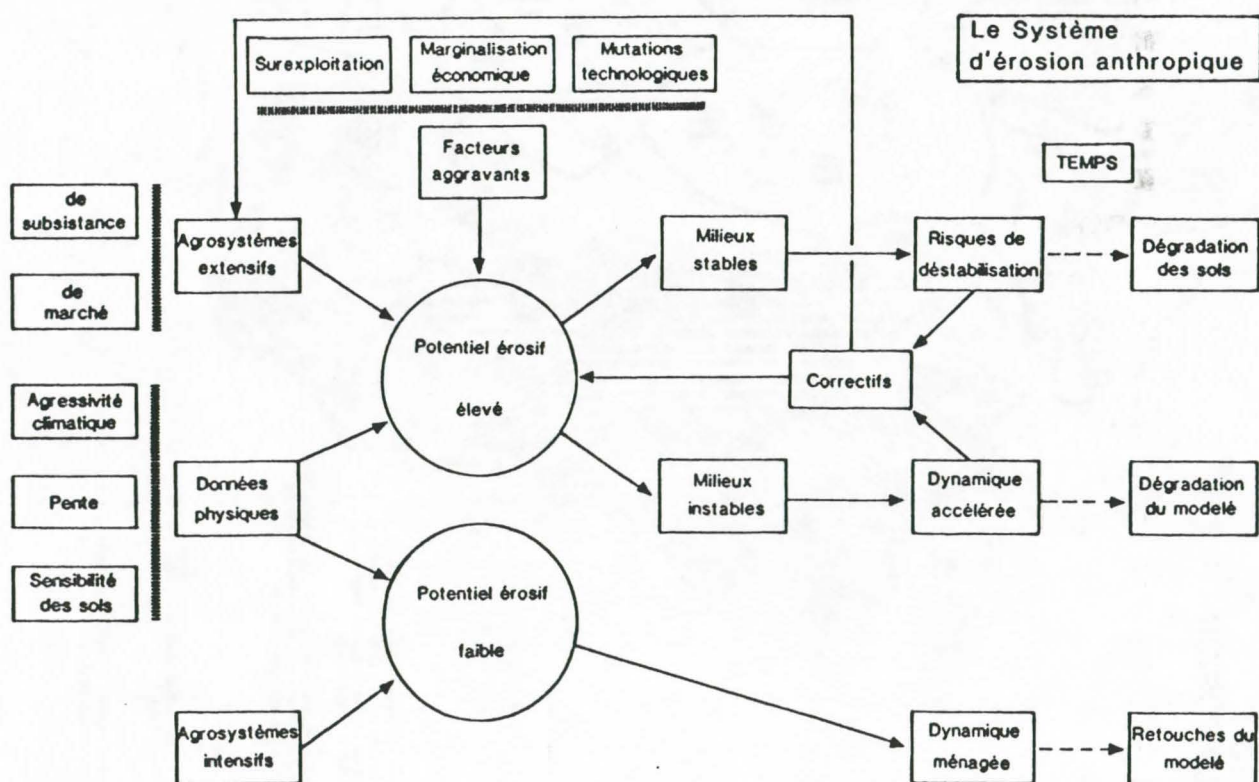
L'ensemble des conditions locales naturelles et agricoles font de la Réunion l'une des régions du globe où l'érosion est la plus active (GUENNELON, 1955; BOUGERE et al., 1990). BOUGERE a dressé une carte de la sensibilité à l'érosion (1990, carte 6), forte dans les zones d'altitude sur andosols. A titre d'exemples, citons quelques données recueillies ces dernières années : lors du cyclone Firinga (janvier 1989), 30 à 35cm de terre ont été décapés sur quelques centaines de m² à Piton Goyave (sud) (BOUGERE et al., 1990) ; dans la zone maraîchère de Piton Hyacinthe (sud), la perte de près d'un mètre de sol en une quinzaine d'années a conduit à l'abandon de parcelles où le tuf induré et stérile affleure désormais ; sur le site expérimental CIRAD de Trois Bassins-Cocâtre (ouest) et à Beaumont (nord-est), des mesures effectuées sur des parcelles de Wischmeier entre 1985 et 1988 révèlent des pertes en terre totales annuelles de 20 à plus de 500 tonnes par hectare, selon les itinéraires pratiqués (valeurs extrapolées à partir de parcelles élémentaires, BOUGERE, 1988).

Figure III.1.

Paramètres et facteurs de l'érosion et les risques correspondants		
Paramètres de l'érosion	Facteurs de l'équation Wishmeier	Les risques correspondants
Érosivité	R	Climatique
Érodabilité des sols	K	Pédologique
Aménagements fonciers et parcellisation de la topographie	S L	Anthropique
Art de l'agriculteur ou de l'entrepreneur	P	
	C	

(HENENSAL P., 1987)

Figure III.2.



(NEBOIT R., 1983)

LA REUNION SENSIBILITE A L'EROSION

échelle



légende

I SENSIBILITE FAIBLE OU NULLE

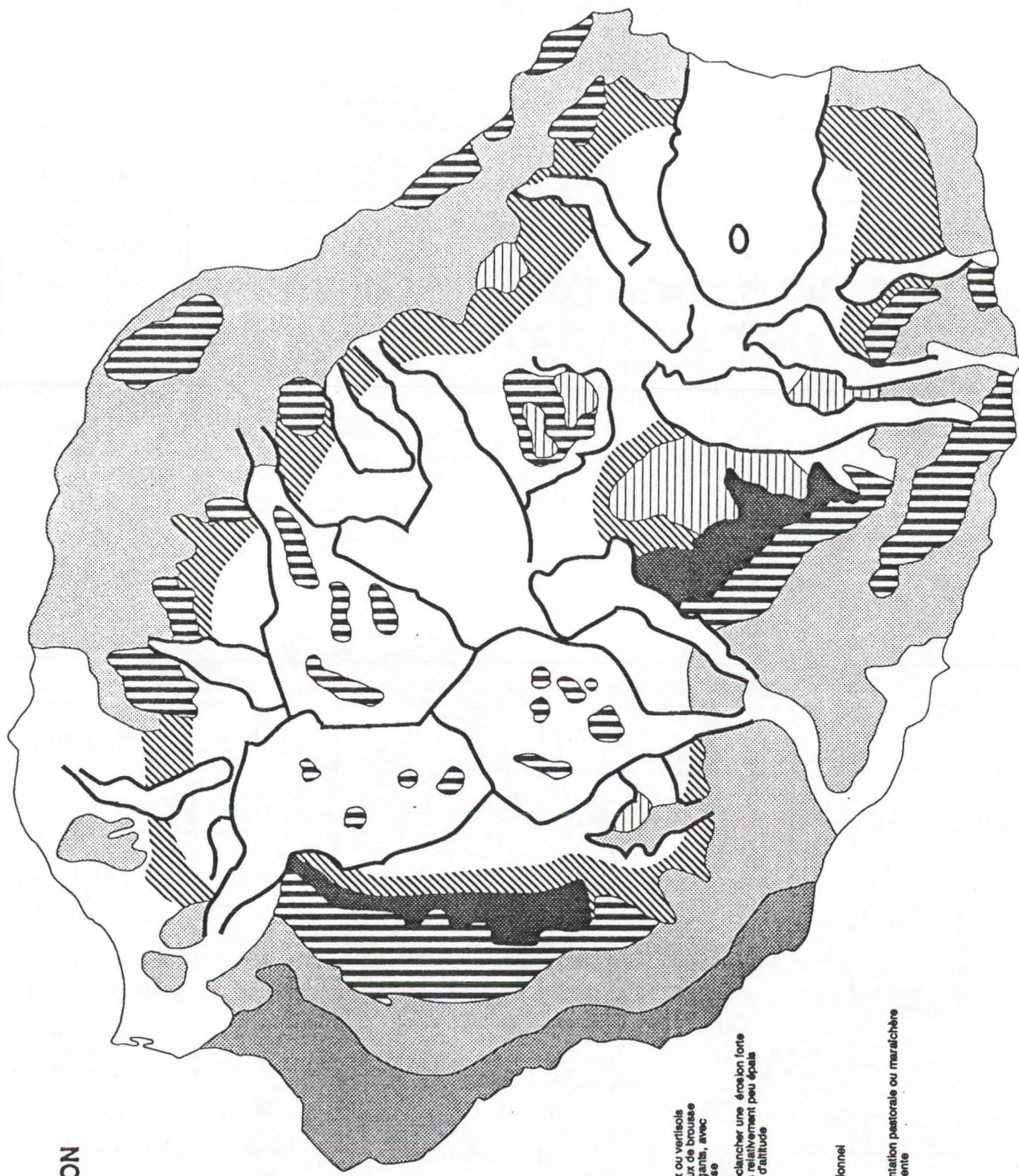
- canne à sucre (bonne couverture)
- pâturages bien enherbés ou anciens

II SENSIBILITE MOYENNE A FORTE

- jachères à sols souvent très caillouteux ou vertisols épais menacés ou attaqués par des feux de brousse annuels plus pâturage de caprins divagants, avec végétation très lente due à la sécheresse
- zone ou la mise en valeur (risque de déclancher une érosion forte (visible en forêt de production) sur sols relativement peu épais à régénération lente due à la fraîcheur d'altitude

III SENSIBILITE FORTE

- orientation maraichère, géranium traditionnel ou cultures vivrières des cirques
- zone récemment mise en valeur à orientation pastorale ou maraichère avec travail du sol dans le sens de la pente



J. BOUGERE. Cartographie: B. REMY

Carte 6. Sensibilité des sols à l'érosion.

Les principales observations issues de ces mesures sont les suivantes (BOUGERE et GOPAL, 1986, 1988) :

- l'érosion pluviale des andosols cultivés revêt deux aspects : ruissellement diffus en nappe assurant un transport modéré des particules, ruissellement concentré en rigoles confluentes et très érosives,
- la seule hauteur de précipitations n'explique pas les différences observées entre parcelles expérimentales ; à pente identique, le couple intensité-durée des pluies est le facteur explicatif essentiel, avec en particulier une excellente corrélation entre le poids de terre exportée et l'intensité instantanée moyenne sur 30 minutes (I30), le temps de ressuyage entre deux averses, qui conditionne l'état hydrique du matériau, semble lui aussi important,
- la "stabilité" des andosols vis-à-vis de l'érosion est nettement remise en cause, l'anthropisation semble déterminante, l'érosion étant particulièrement intense lorsque le sol a été remanié,
- contrairement aux processus généraux affectant les sols tropicaux, sur lesquels la battance et l'effet "splash" contribuent principalement à l'érosion (ROOSE, 1981), un type d'érosion spécifique semble exister sous forme de transport d'agrégats de faible masse volumique, l'hypothèse d'un transport par flottement est avancée, la nature des produits transportés évolue dans le temps (4 années de mesures), des agrégats plus grossiers sont exportés,
- les intensités moyennes maximales atteintes en 30 minutes (I30) sont de l'ordre de 20 à 30 mm, exceptionnellement elle atteignent 50 mm lors d'épisodes cycloniques (février 1986), ces chiffres relevés sur 4 années restent inférieurs à la valeur seuil fixée à 60 mm, généralement admise pour qualifier une forte intensité (COUTERON, 1987), l'étude de DURET (1982) permet une estimation des intensités maximales à caractère décennal et montre que les I30 décennales sont de l'ordre de 100 mm, pour atteindre 140 mm en altitude (1 200 m, ouest).

D'autres recherches (PY et CLARIOND, 1989) ont montré le caractère auto-catalytique de l'érosion : plus un matériau est dégradé et déjà érodé, plus il sera sensible à l'érosion et difficile à régénérer. Les différences d'état structuraux entre les différents faciès superficiels observés soulignent leur importance dans les processus érosifs.

Les nombreuses et déjà anciennes préconisations en matière de protection de ces sols contre l'érosion hydrique sont plus que jamais valides (GUENNELON, 1955 ; RAUNET, 1991).

1.2. Méthodes de travail et objectifs

Compte tenu de l'ensemble des observations préalables effectuées et en l'absence de références précises concernant les mécanismes fondamentaux générateurs d'érosion, il apparaît nécessaire d'étudier les comportements structuraux et hydrodynamiques des horizons superficiels d'andosols cultivés.

L'agrégation (distribution dimensionnelle des structures construites élémentaires, leur stabilité) est présentée, ainsi que les facteurs de sa dynamique. A l'échelle d'une parcelle expérimentale, on étudie la variabilité de différents paramètres caractérisant la structure superficielle, et leurs inter-relations.

On aborde ensuite les fonctionnements hydrodynamiques et les comportements structuraux superficiels de différents types d'horizons culturaux d'andosols. L'approche expérimentale envisagée met en oeuvre en particulier un infiltromètre à aspersion, permettant la simulation de pluie. L'incidence des caractéristiques du sol (état structural en particulier) et des itinéraires techniques sont étudiées. Il ne s'agit

pas de quantifier avec précision l'ensemble des phénomènes impliqués dans l'érosion, mais plutôt d'identifier des mécanismes qui conduisent au ruissellement, en liaison avec les itinéraires techniques et les types de substrat.

Les informations recueillies en matière d'état structural et de fonctionnement hydrodynamique ont un intérêt qui dépasse la connaissance des phénomènes d'érosion, elles permettent plus largement une évaluation des potentialités agricoles de ces sols.

L'unité de base du travail est la parcelle, même si par nature, de nombreuses manipulations de terrain sont ponctuelles. La multiplication de la mesure de certains paramètres doit permettre d'en connaître la variabilité et les inter-relations à cette échelle, par la mise en oeuvre de méthodes d'analyses de données spatialisées.

L'ensemble des recherches ont été conduites sur les stations expérimentales CIRAD de Trois Bassins-Cocâtre et de Fond Jardin, à 1 000 m d'altitude, sur andosol chromique désaturé non perhydraté. Ce sol correspond au profil O4 décrit et étudié dans la seconde partie. Les parcelles, terrains de ces études thématiques, font l'objet de suivis agronomiques et économiques et s'intègrent au système de culture à base de géranium des Hauts de l'ouest, les spéculations présentes sont du géranium ou des cultures vivrières et maraîchères d'accompagnement (le plus souvent des rotations haricot / maïs).

2. Agrégation et états structuraux des sols andiques

2.1. Généralités, observations des états structuraux *in situ*

L'agrégation ne concerne que les horizons superficiels des andosols. Dans les horizons d'altération, les études micromorphologiques de DENAIX (1989) révèlent des microstructures élémentaires (nanoagrégats), lieux privilégiés de néoformation d'halloysite par exemple, mais quantitativement peu importants, et, à une échelle macroscopique, quelques microagrégats d'origine faunique.

L'organisation complexe et hiérarchisée mise en évidence par ROSELLO (1984) met en jeu différents niveaux d'assemblage de ces microstructures élémentaires. Au plan structural dans le matériau frais, l'ensemble est fondu en une matrice continue. Des structures peu nettes sont révélées par tamisage délicat du matériau frais O4 Sa sous l'eau, de diamètre compris entre 0.5 et 2 mm, très instables et représentant moins de 50% du poids sec total (PY et CLARIOND, 1989). Des niveaux structuraux stables et nettement différenciés n'apparaissent que lors de la dessiccation. *In situ*, ils concernent l'horizon affleurant soumis aux contraintes climatiques, et dépendent des processus décrits dans la seconde partie.

La simple observation visuelle du profil d'un andosol confirme cette dualité structurale prononcée entre horizons (RAUNET, 1991) : à l'état frais, le matériau profond présente une structure "fondue", continue, sans fissure ni agrégats visibles, au tamisage à sec. C'est le diamètre des mailles du tamis qui détermine la taille des agrégats du matériau conservé frais, générant ainsi des artefacts opératoires. En revanche, l'horizon superficiel apparaît toujours nettement structuré :

- avec des agrégats grumeleux et très stables, d'origine principalement faunique si l'horizon humifère originel (Aa, LAa) est préservé, sa profondeur varie entre 10 et 40 cm,

- plutôt à structure particulière, plus fine, et superficiellement (quelques cm), si l'horizon d'altération affleure après décapage (Sa dégradé, L_{Sa}). L'agrégation dépend alors principalement du niveau de dessiccation atteint puis des contraintes mécaniques ultérieures : l'état de cet horizon découle directement des processus décrits dans la deuxième partie. L'horizon andique Sa sous-jacent conserve ses qualités physiques originelles au delà de 10 cm, sauf si les opérations culturales le remanient plus profondément (L_{Sa}).

En l'absence de structures construites cohérentes, l'agrégat constitue l'élément structural de base des horizons culturaux d'andosols car dans les deux d'horizons, les structures construites de type motte sont :

- soit des ensembles macro-agrégés et cohérents constitués d'agrégats grumeleux grossiers regroupés en mottes rugueuses et macro-poreuses dans le cas des horizons humifères Aa en place (état gamma Γ d'après les critères et la méthode développée par MANICHON, 1982 ; figures III.3-4.). La mise en culture amoindrit progressivement cette cohérence : on assiste à un passage de structures de l'état Γ à un état fragmentaire composé d'agrégats élémentaires issus de l'action des outils ;

- soit inexistantes dans le cas des horizons Sa en place, la matrice fondue est continue, la mise en culture et en particulier le travail du sol peut générer des mottes directement issues du découpage par les outils, ces structures pourraient s'apparenter aux états Δ mais elles ne résultent pas de contraintes sévères (mécaniques ou hydriques) car le matériau directement au contact des pièces travaillantes est fragmenté. Les mottes conservent les caractéristiques initiales du matériau Sa en place : faible cohérence, forte microporosité, leur dessiccation progressive dans l'horizon travaillé occasionne une fragmentation en agrégats élémentaires par "desquamation" périphérique (selon les processus décrits au chapitre III de la deuxième partie).

On notera au passage l'absence avérée d'une nomenclature précise concernant les horizons culturaux des andosols. La définition des solums de référence (approche pédogénétique) ne prend pas en compte la différenciation morphologique et fonctionnelle d'horizons superficiels très variés, générés par l'anthropisation et l'érosion (QUANTIN, 1990).

RAUNET (1991) a schématisé la succession chronologique des horizons par érosion et dégradation progressive (figure III.5.). Les observations récentes effectuées permettent de conforter et d'amender ce schéma dans la description des états structuraux et de leur évolution sous contraintes bioclimatiques et anthropiques (figure III.6.) :

Le profil initial (faciès 1 de la figure III.6.) constitue le pédoclimax développé sous friche ligneuse, l'horizon Aa humifère (légende A) a une structure grossière grumeleuse, dépendante d'une activité biologique intense (macro et micro-faune, racines) et déterminant une forte macroporosité et des mottes cohérentes. L'horizon Sa sous-jacent est très humide, massif, de structure continue, à très forte porosité, essentiellement fine (légende D). Cet horizon d'épaisseur variant généralement entre 1 et plusieurs mètres, constitue la constante du système : seul son épaisseur va varier, ses caractéristiques principales restant identiques, même dans les profils les plus dégradés où il affleure à quelques centimètres de la surface.

La mise en culture va provoquer des modifications progressives de cet état initial. Le défrichement au bœuf occasionne généralement un décapage des premiers centimètres. On assiste à une minéralisation accélérée de la matière organique, et la moindre activité des racines des cultures provoque une modification de l'état structural (agrégats de plus petite taille, moins stables, mottes peu cohérentes) (légende B).

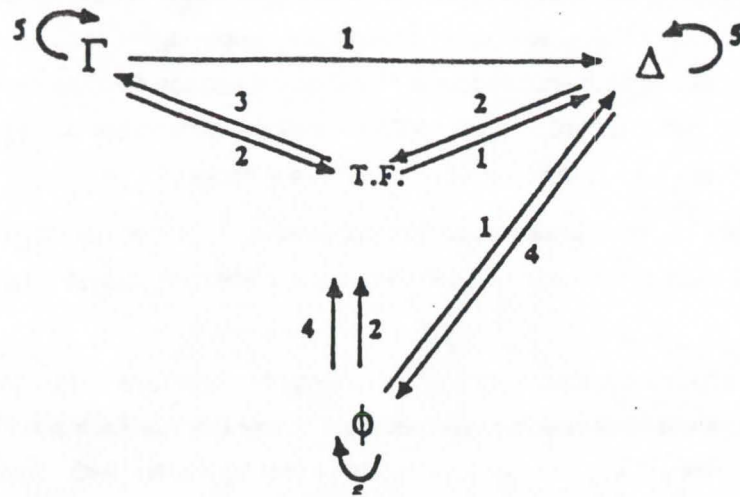
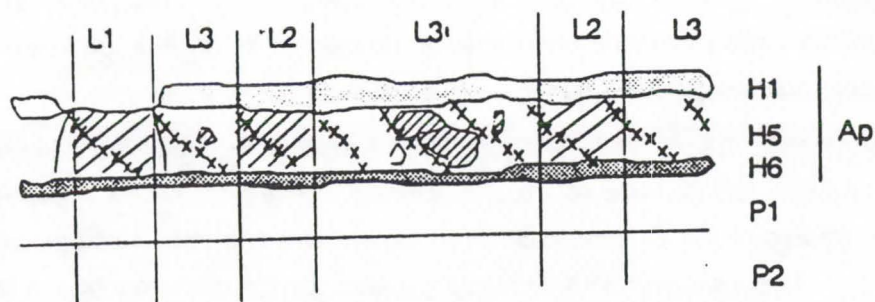


Figure III.3. Schéma des inter-relations entre états internes (MANICHON, 1982)

Légende :

1. Création d'une structure continue : résultat de l'application d'une contrainte (pression, humidité) sévère, d'origine anthropique (sauf prise en masse à la dessiccation)
2. Fragmentation par les outils
3. Agglomération (interactions Climat-Texture-Faune...), contraintes modérées
4. Fragmentation par gonflements et retraits (interaction Climat-Texture)
5. Fluctuations sans changement d'état interne

Figure III.4. Partitions du profil cultural (MANICHON, 1982)



Nomenclature des différents horizons :

	H0	Surface du sol
Horizon labouré Ap	H1-H4	Horizons de reprise du labour
	H5	Horizon labouré non repris
	H6-H7	Bases d'horizons labourés anciens
	H8	Horizons partiellement ameublés par des outils profonds (sous soleuse)
	P1-P2	Horizons pédologiques

Partition latérale :

L1	Passages de roues après reprise superficielle
L2	Passages de roues avant reprise superficielle
L3	Sans passage de roues durant les travaux préalables à l'implantation de la dernière culture

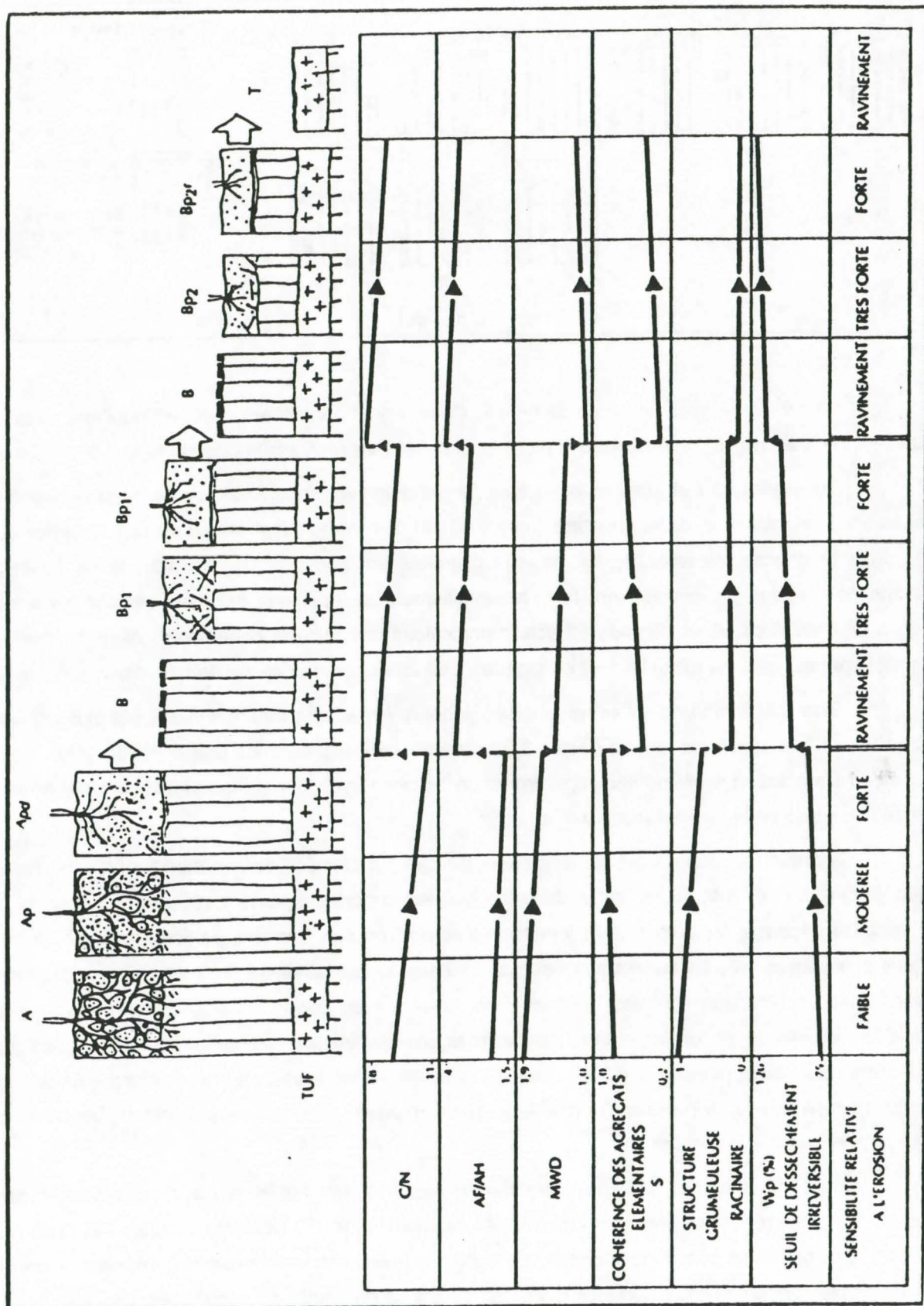
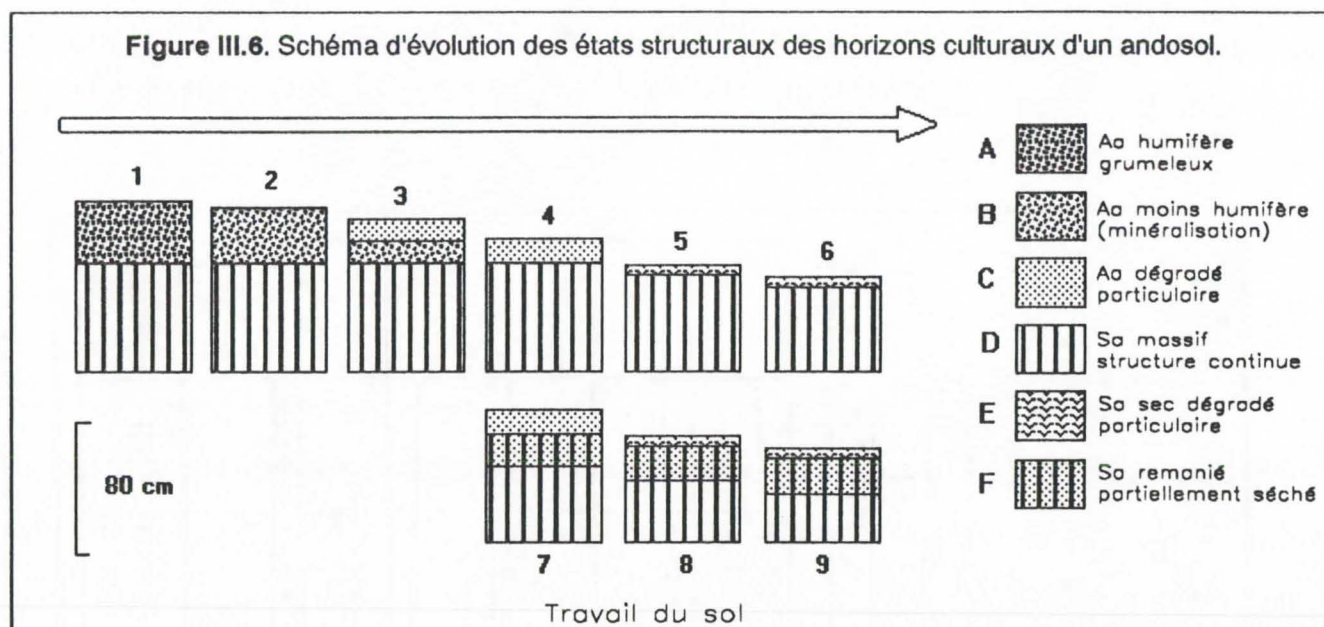


Figure III.5. Schéma de la succession chronologique des processus de dégradation et d'érosion des andosols désaturés non perhydratés

Figure III.6. Schéma d'évolution des états structuraux des horizons cultureux d'un andosol.



Le sol évolue vers un faciès de type 2. Celui-ci peut constituer un nouvel équilibre sous prairie ou sous canne à sucre, où l'on rencontre le plus fréquemment les profils cultureux de type 2-3, voire 4 ou 7.

Sous géranium et cultures associées, le remaniement superficiel par sarclage occasionne un émiettement plus important de la structure (même si l'on observe un état structural plus grossier et plus stable dans la couche superficielle), les mottes disparaissent (légende C). A partir de ce faciès 3, le décapage par érosion pluviale devient fort, essentiellement associé aux périodes climatiques à risque. L'horizon LAa s'amincit, et se dégrade (structure particulaire fine et sans cohérence), devenant facilement mobilisable par les eaux de ruissellement concentrées. La teneur en eau de cet horizon diminue (faciès 4).

Si la préparation du sol est mécanisée (labour), l'épaisseur de sol remanié est plus importante, l'horizon Sa est généralement touché (faciès 7), cette couche labourée subit une déshydratation modérée (rupture de l'alimentation par remontée capillaire) et un mélange avec le matériau particulaire sec de surface (légende F) ou issu de la fragmentation par les outils.

Lorsque l'horizon Aa est complètement évacué par l'érosion, le matériau Sa affleure. Remanié ou non (faciès 5-6 et 8-9), il va subir dans sa couche superficielle une dessiccation poussée (seuil d'irréversibilité dépassé) conduisant à la formation d'un horizon sec finement particulaire à pulvérulent de quelques centimètres, très facilement mobilisé par les eaux de ruissellement voire par le vent (légende E). Juste en-dessous, l'horizon Sa reste identique en l'absence de travail du sol, ou présente une zone intermédiaire en cas de labour (légende F) ou d'intense activité racinaire des cultures. A ces stades (faciès 5-6 et 8-9), l'abrasion pluviale est très rapide, accentuée par toutes les opérations provoquant la dessiccation superficielle de l'horizon Sa (sarclage, récoltes provoquant des remaniements, travail du sol à émiettement excessif -outils animés-).

Sous géranium et cultures maraîchères sarclées, les faciès 4 ou 7 sont parfois encore rencontrés ; en zone fortement dégradées, des faciès de type 6 et 9 sont courants dans les Hauts de l'ouest et du sud. Sur certaines zones de cultures maraîchères anciennes et intensifiées, l'épaisseur de Sa a presque complètement disparu à son tour et le fond de travail des outils de préparation des sols butte sur des niveaux de tuf induré et stérile (Hauts du sud).

Les profils cultureux sous itinéraires mécanisés apparaissent en réalité très variés et ne peuvent évidemment être décrits en un schéma (faciès 7-8-9). Une approche spécifique en est faite au chapitre suivant.

Au plan du comportement des peuplements végétaux, la tendance lourde d'évolution des substrats de culture correspond à une baisse de fertilité, essentiellement physico-chimique mais également mécanique. L'environnement racinaire dans le matériau Sa est de moindre qualité par rapport au matériau originel Aa : diminution des taux de matière organique et d'éléments nutritifs (blocages et rétentions actives...), résistance supérieure à la pénétration racinaire... L'ensemble se traduisant par des rendements plus faibles et plus hétérogènes (MICHELLON, 1986). Le maintien de la fertilité dépend alors fortement de l'adaptation des itinéraires techniques : des apports massifs et répétés de matière organique sont déterminants, associés à une fumure minérale supérieure, éventuellement à des chaulages.

On observe couramment sur des parcelles limitées par des andains anti-érosifs, une érosion forte dans la zone haute (faciès 6 ou 9) et une accumulation d'agréats et particules dans la zone basse (faciès 4 ou 7). Ces phénomènes de colluvionnement occasionnent souvent une variation de la fertilité dans le sens de la pente, le géranium étant plus productif en bas de parcelle (accumulation de l'eau, des éléments fertilisants, des agrégats plus grossiers humifères...). L'aplanissement des parcelles et la formation de terrasses successives en résultent. Dans le haut de la parcelle, le tuf, voire des affleurements basaltiques ("reins"), apparaissent.

2.2. La quantification de la structure, un problème métrologique

Pour quantifier l'état structural (répartition dimensionnelle des agrégats) et sa stabilité, la méthode classique de HENIN (1976) ou les méthodes affiliées plus récentes (LE BISSONNAIS, 1988), celles proposées par EMERSON (1991) ne peuvent être retenues dans le cas des andosols, compte tenu de la forte réactivité du matériau aux contraintes hydriques. L'échantillon de départ utilisé est en effet constitué d'agréats secs, dans ces méthodes, par ailleurs lourdes à mettre en oeuvre pour des séries importantes. De plus, CHARVE (1972) montre que l'effet des pré-traitements (eau-alcool-benzène) est faible sur des andosols du Massif Central, du fait des teneurs très élevées en M.O.. EGAWA (1977) signale que des contraintes hydriques poussées (dessiccation préalable) réduisent artificiellement la stabilité à l'eau d'agréats d'andosols du Japon.

Le Laboratoire CIRAD-ENSAM de Gestion Physique des Sols de Montpellier (LAGEPHY ; BROUWERS et FORTIER, 1989) a mis au point un test adapté aux sols andiques, permettant de quantifier dimension et stabilité des macro et méso-agrégats du sol (5 à 0.05 mm). Cette méthode met en oeuvre une humectation progressive jusqu'à saturation des structures puis un tamisage délicat sous faible débit d'eau, l'échantillon a été conservé à son humidité de prélèvement (déterminée par ailleurs).

Le sol est préalablement tamisé à 5 mm et amené à saturation, puis lavé délicatement sur une colonne de 5 tamis de mailles 2, 1, 0.5, 0.2, 0.05 mm. Les refus sont récupérés et pesés après étuvage à 105 °C. On obtient 6 classes de dimensions granulométriques (la fraction inférieure à 0.05 mm est obtenue par différence par rapport au poids total). Un échantillon identique au premier est soumis à une dispersion modérée aux ultra-sons dans l'eau (2 min., puissance 56 W, fréquence 20 kHz) puis fractionné sur tamis de la même façon.

On peut ainsi calculer deux indices d'émiettement sous la forme d'un diamètre moyen pondéral des agrégats (*Mean Weight Diameter* : MWD), l'un après simple lavage : MWD_{lav} , ou plus simplement MWD, le second après sonification et lavage : MWD_{us} .

MWD est tel que :

$$MWD = \sum_{i=0}^{i=2} \{(R_i \cdot d_i) / 100\}$$

avec : R_i =refus du tamis de maille i en poids sec %, d_i =diamètre moyen des deux tamis successifs, $i = 0, 0.05, 0.2, 0.5, 1$ ou 2 mm.

MWD est donc compris entre 0.025 mm (diamètre moyen du tamis 0.05 mm et 0) et 3.5 mm (diamètre moyen des tamis 5 et 2 mm).

La stabilité du matériau (ou cohésion) est évaluée par le calcul d'un indice $S = MWD_{us} / MWD_{lav}$ compris entre 1 (stabilité parfaite à l'énergie de sonification) et $7.14285 \cdot 10^{-3}$ ($0.025 / 3.5$, compte tenu de la fraction la plus fine mesurée). Les nombreuses références obtenues montrent que S varie essentiellement entre 0.5 (très faible stabilité) et 0.95 (forte stabilité).

La sonification agit sur le milieu aqueux environnant les agrégats et sur l'eau qu'ils contiennent, par cavitation et agitation. Les agrégats sont à la fois abrasés et éclatés.

La manipulation considère 3 échantillons virtuellement identiques d'un même matériau : pour la mesure de la teneur en eau, de MWD_{lav} , de MWD_{us} . La variabilité de la mesure de MWD_{lav} et celle de l'indice S nécessitent habituellement 5 répétitions pour leur détermination (coefficient de variation proche de 5%).

2.3. Déterminants de l'état structural et résultats obtenus

2.3.1. Types de substrats , matière organique et état hydrique

PY et CLARIOND (1989) et WEYLAND (1990) ont montré que les tailles moyennes d'agrégats dans les matériaux profonds Sa de différents andosols de Cocâtre et Fond Jardin étaient comparables, ainsi que leurs stabilités. En revanche, les états structuraux des horizons superficiels sont très variables et dépendent de leur nature (Aa, LAa, LSA, dégradation par l'érosion) et des itinéraires techniques pratiqués.

Ces auteurs ont mis en évidence la corrélation négative nette entre teneur en eau pondérale du matériau et stabilité des agrégats. Ce facteur discrimine en fait les types de matériau : horizons profonds très humides et peu stables, horizons superficiels agrégés, stables et secs. Un simple regroupement par type de sol rend cette corrélation plus incertaine, en particulier pour les horizons superficiels soumis à beaucoup d'autres facteurs. Concernant les horizons andiques profonds d'altération, BROUWERS et FORTIER (1989) ont procédé à la mesure des MWD et de S sur du matériau andique très proche du profil O4 (Trois Bassins) en dessiccation expérimentale progressive. Ils montrent qu'à partir d'un seuil de teneur en eau pondérale équivalent à celui cerné dans la seconde partie pour d'autres propriétés (pF 4), la stabilité du matériau augmente brutalement, passant de valeurs inférieures à 0.5 , à des valeurs très proches de 1 pour le matériau séché. La taille moyenne mesurée des agrégats (MWD) augmente sensiblement au cours de la dessiccation.

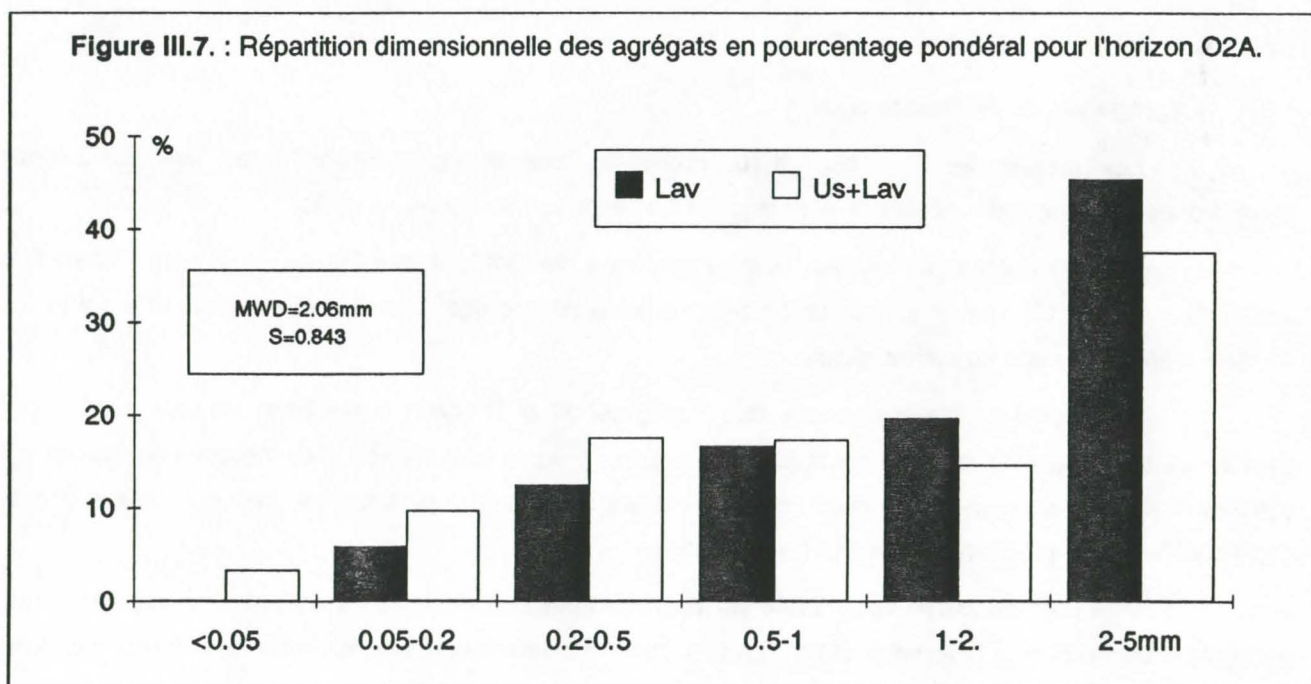
CHARVE (1972) montre l'importance de la matière organique abondante sur la stabilité des agrégats d'andosols du Massif Central : l'indice d'instabilité Is de HENIN est nettement corrélé à la teneur en carbone total. WEYLAND (1990) confirme la forte corrélation entre la teneur en carbone organique total et l'indice de stabilité S des agrégats sur des andosols réunionnais, PY et CLARIOND (1989) précisent que les teneurs en acides humiques et les fractions d'azote non hydrolysable expliquent positivement l'indice de stabilité S, les autres formes du carbone organique n'étant pas significatives. Cette incidence prédominante de la M.O. peut expliquer la faible stabilité des matériaux superficiels érodés. Ces auteurs montrent que sur ces matériaux dégradés, des apports de matière organique massifs et localisés (5 à 10 t/ha de compost de géranium, au sillon) ont un effet positif et rapide sur la stabilité des agrégats. Dans les couches superficielles soumises à l'érosion, le stock organique peut rester stable dans les premiers stades de dégradation, mais sa nature évolue : augmentation du rapport acides fulviques / acides humiques, du rapport C / N (PY et CLARIOND, 1989).

Le brûlage (accidentel ou par écobuage) de l'horizon humifère d'origine provoque une destruction totale de la structure agrégée (CLARIOND et PERRET, 1990), par combustion des éléments organiques, par une mobilisation complète de la matrice allophanique en micro-particules. On observe par ailleurs des modifications physico-chimiques importantes liées à la combustion : libération massive de phosphore assimilable, élévation significative du pH.

2.3.2. Résultats obtenus sur les profils O2 (brun andique) et O4 (andosol)

□ Agrégation dans le sol brun andique O2

Les graphiques III.7. et III.8. montrent les distributions dimensionnelles pondérales obtenues pour le profil O2 (sol brun andique), horizons A et B, sous forme d'histogrammes.

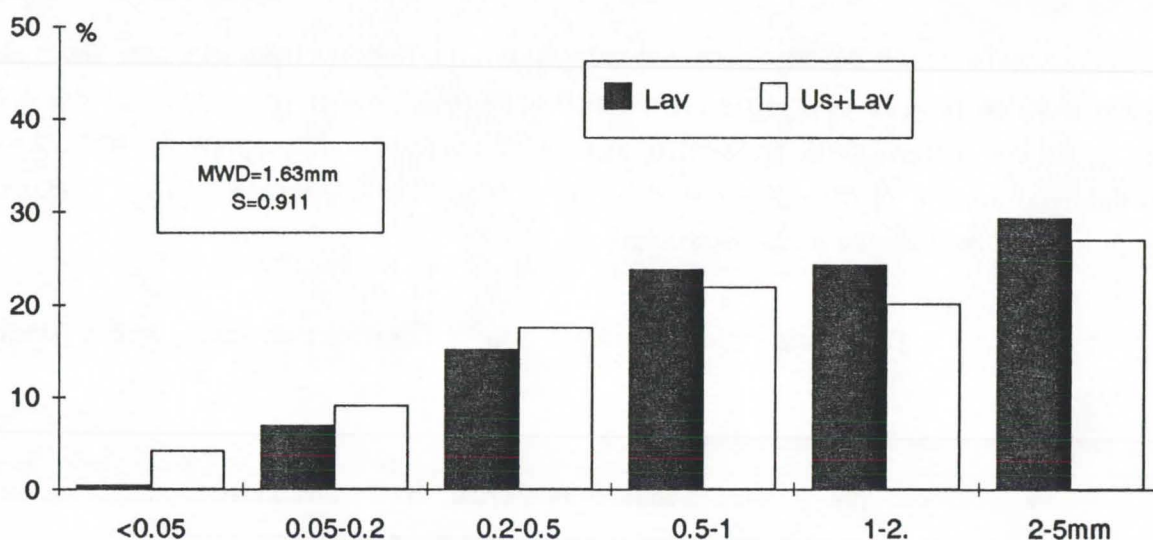


On observe d'une part la taille moyenne des agrégats supérieure dans l'horizon superficiel qu'en profondeur, la taille moyenne des agrégats dans l'horizon A étant élevée : MWD=2.06mm ; d'autre part

la forte stabilité de ces horizons. L'action des ultra-sons apparaît être principalement une abrasion modérée des agrégats les plus gros (> 0.5 mm) venant enrichir le pool d'agrégats plus petits, les particules résultant de l'abrasion se retrouvant dans la fraction la plus fine (< 0.05 mm), inexistante sous lavage simple.

Sur ces matériaux halloysitiques, l'effet d'un séchage expérimental préalable prolongé à l'air (équivalent à pF 6) est spectaculaire : les agrégats brutalement réhumectés sur la colonne de tamis se délitent fortement. Pour l'horizon A, MWD tombe à 0.97 mm (S=0.84), pour l'horizon B, MWD tombe à 0.40 mm (S=0.93). La différence de comportement entre les deux matériaux peut être liée au taux en M.O., faible dans l'ensemble, de l'ordre de 4.3% dans l'horizon A, de 2.2% dans l'horizon B.

Figure III.8. : Répartition dimensionnelle des agrégats en pourcentage pondéral pour l'horizon O2B.



□ Agrégation dans l'andosol O4

Les graphiques III.9. et III.10. montrent sous forme d'histogrammes, les distributions dimensionnelles pondérales obtenues pour le profil O4 (andosol), horizons Aa et Sa.

Pour l'horizon superficiel Aa, la taille moyenne des agrégats est élevée, et ils sont stables à la sonification qui semble agir principalement par éclatement des agrégats de diamètre supérieur à 1 mm. La fraction la plus fine reste au même niveau.

La répartition dimensionnelle des agrégats dans l'horizon d'altération Sa est particulière, centrée sur les fractions intermédiaires 0.05 à 1 mm. Les agrégats sont stables. Des mesures effectuées sur d'autres matériaux du même type montrent des indices S beaucoup plus faibles, inférieurs à 0.5 (PY et CLARIOND, 1989 ; BROUWERS et FORTIER, 1989).

Une représentation sous forme de courbes cumulatives de la répartition dimensionnelle des agrégats souligne bien la différence entre l'horizon d'altération andique Sa et les autres matériaux andiques (Figure III.11.).

Le séchage préalable à l'air du matériau andique superficiel Aa a un effet peu marqué sur la taille moyenne des agrégats et sur leur stabilité, peut-être du fait de la forte teneur en M.O. qui stabilise les

structures (14.3%). Pour l'horizon profond Sa et conformément aux observations concernant l'évolution des micro-structures lors de la dessiccation, le séchage préalable provoque une augmentation de la taille moyenne mesurée des agrégats (MWD atteint 1.49 mm), leur stabilité reste forte ($S=0.80$). Ces résultats concordent avec ceux obtenus par BROUWERS et FORTIER (1989), exposés plus haut.

L'incidence de traitements expérimentaux sur l'agrégation ne reflètent cependant pas toujours des comportements structuraux observés au champ, lesquels sont tributaires de multiples facteurs.

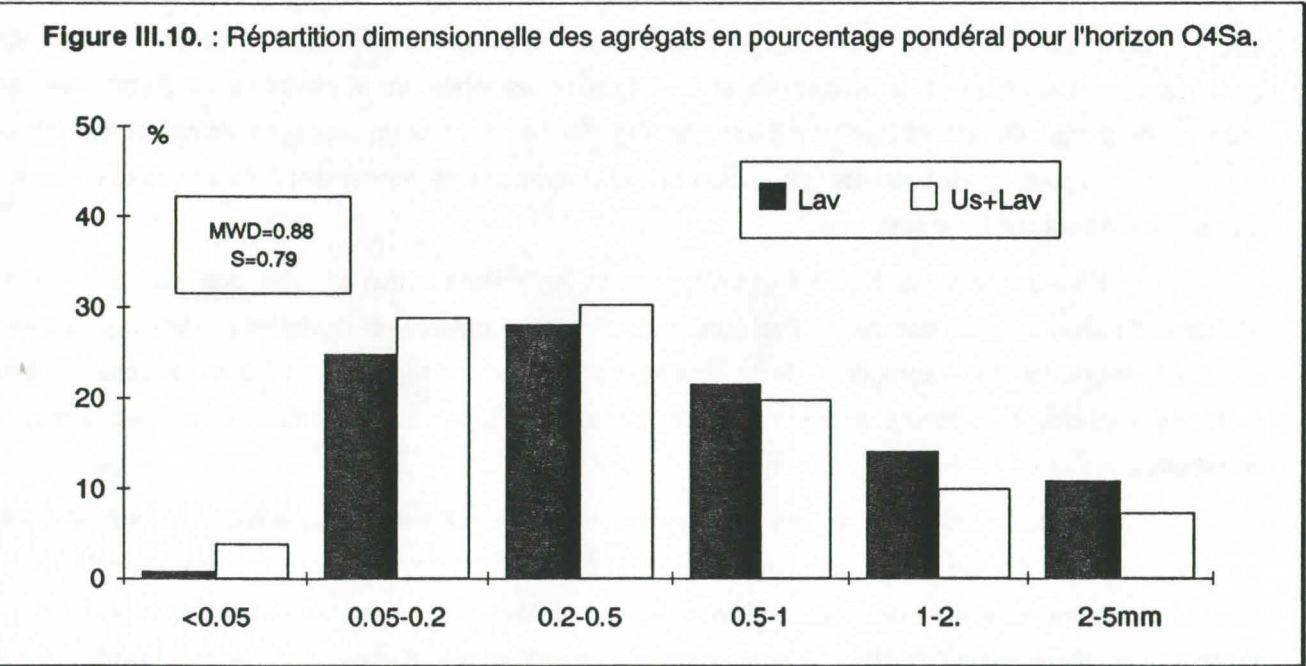
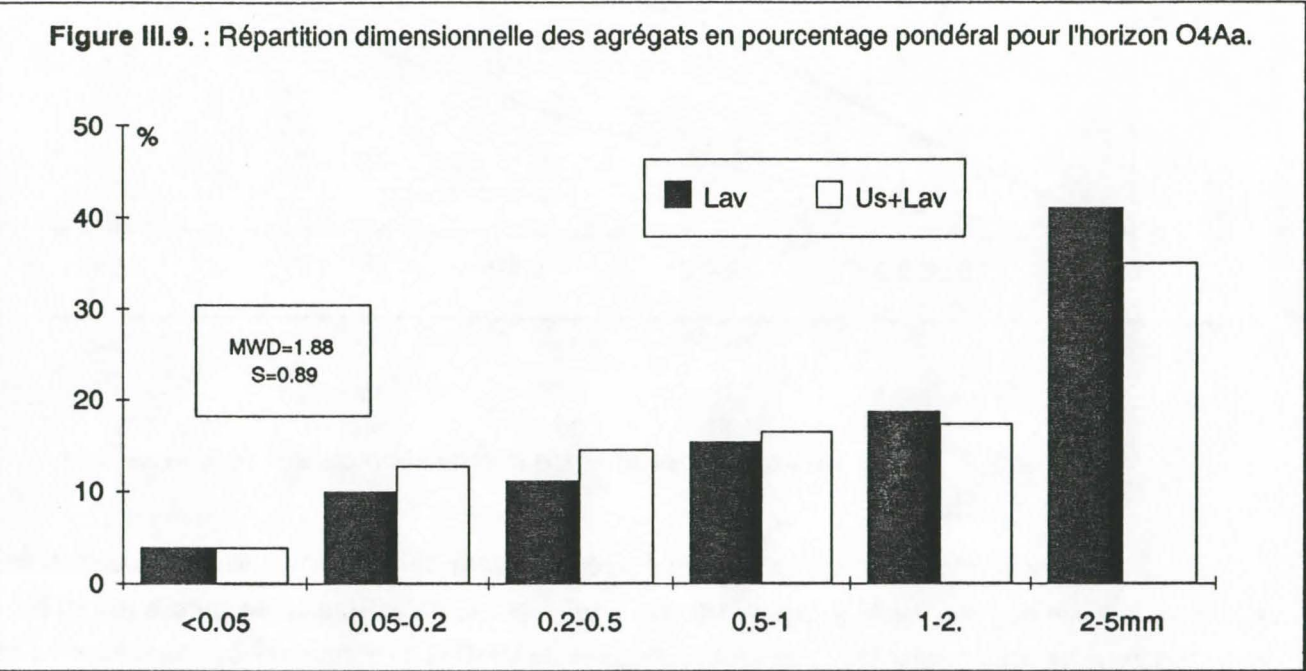
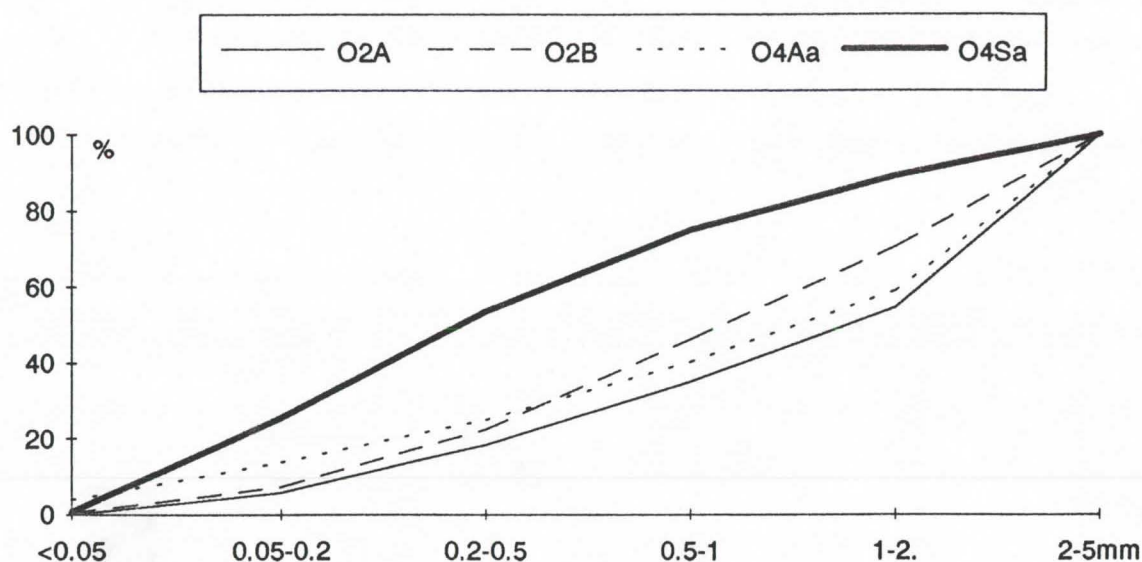


Figure III.11. : Répartition dimensionnelle des agrégats en pourcentage pondéral cumulé pour les profils O2 et O4.



2.3.3. Incidences des itinéraires de préparation de sol : observations ponctuelles

Des prélèvements plus localisés ont été réalisés dans des horizons affleurants de différentes natures sur le site de Fond Jardin (andosol, 1 000 m ; Aa en place, Sa affleurant), en surface (0 - 10 cm) et dans une zone "hypodermique" (10 - 20 cm). Les mesures de MWD et de S montrent que dans tous les cas, la taille moyenne mesurée des agrégats, et leur stabilité sont supérieures dans la zone la plus superficielle. Seul l'horizon dégradé Sa affleurant non labouré échappe à la règle sans qu'une explication objective puisse être proposée (dans le cas de ces parcelles de mise en culture récente, l'effet des itinéraires est sans doute encore faible). Les données obtenues (figure III.12.) montrent bien la répartition de la matière organique dans ces zones superficiels et les dilutions et mélanges occasionnés par le travail du sol (symbolisé par L dans les horizons). On notera que les mesures ont été effectuées après un seul cycle de culture (un labour), ceci expliquant peut-être les résultats peu différents ou contradictoires concernant l'impact des opérations de préparation de sol sur l'état structural.

En effet, d'après EGAWA (1977), la mise en culture réduit la taille des agrégats sur des andosols du Japon (action des outils). Des études réalisées sur andosols perhydratés au Japon (OGAWA et al., 1988) montrent que l'agrégation de la couche cultivée est préservée sous travail minimum à faible profondeur (5 cm, cultivateurs à dents ou rotatifs), alors que le labour profond détruit les structures construites.

Sur des parcelles contiguës et conduites parallèlement avec et sans travail du sol pendant 4 années de culture (toutes autres opérations culturales étant égales par ailleurs), des prélèvements répétés dans la zone superficielle ont été réalisés afin de déterminer les tailles moyennes des agrégats MWD et leur stabilité S (Trois Bassins Cocâtre, 1 000 m, andosol non perhydraté, à quelques mètres du profil O4). Sur ces parcelles, l'horizon Aa a été préservé mais présente un état structural de surface très différent en fonction des itinéraires pratiqués (Tableau III.13.).

Tableau III.12. Dimension, stabilité et taux de carbone organique total d'agrégats dans différents matériaux

Horizon affleurant	Profondeur	MWD _{lav}	S	C%
Aa	0-10cm	1.94	0.77	10.0
	10-20cm	1.52	0.71	9.3
LAa	0-10cm	2.25	0.85	9.7
	10-20cm	2.04	0.66	9.8
Sa	0-10cm	1.64	0.85	6.1
	10-20cm	1.70	0.76	6.0
LSa	0-10cm	1.61	0.64	4.4
	10-20cm	1.48	0.52	5.7

Tableau III.13. Dimensions et stabilités moyennes d'agrégats : incidence des itinéraires (parcelle en rotation haricot/maïs, 5 points de mesure par parcelle, 3 répétitions).

Type de préparation du sol	MWD _{lav}	S
Labour charrue à soc + sillonnage	1.20	0.90
Sillonnage manuel	1.52	0.75

On notera que pour les deux traitements, les MWD_{us} calculés sont peu différents (de l'ordre de 1.10). Ces diamètres moyens d'agrégats après sonification constituent un niveau maximal d'émiettement, commun aux deux itinéraires et lié au type de matériau. Le MWD_{lav} mesuré dans le cas du labour peut correspondre à un niveau d'émiettement supérieur par rapport à l'itinéraire non motorisé.

2.3.4. Variabilité spatiale et interactions à l'échelle parcellaire

Sur le site expérimental de Fond Jardin, un dispositif de prélèvement selon un maillage régulier chevauchant deux itinéraires techniques est mis en place. Ces itinéraires de productions vivrières (rotation haricot / maïs en deux cycles par an), installés après défriche au début 1989, diffèrent uniquement par l'opération de préparation du sol intervenant avant semis du haricot de premier cycle, en mars : labour à la charrue à soc et sillonnage ou sillonnage seul (2 labours auront été réalisés selon ce schéma avant prélèvements). Ainsi, 80 prélèvements dans la zone superficielle (0 - 10 cm) ont permis la mesure de différents paramètres physiques caractérisant l'horizon cultural. En particulier, MWD et S ont été évalués. Le dispositif permet de mettre en relation les différents paramètres entre eux, d'étudier leur variabilité à l'échelle parcellaire et d'évaluer l'incidence des itinéraires de préparation de sol.

Conformément aux préconisations en cours en matière d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol (VAUCLIN, 1982), nous aborderons les lois de distribution, la structure de variabilité et les paramètres statistiques de ces propriétés, puis les interactions entre variables par une analyse descriptive multivariable (tableaux de Burt).

On note que la parcelle, jugée représentative du contexte général de la zone d'altitude sur andosols non perhydratés, présente des zones érodées où affleure le matériau d'altération Sa sous une forme particulière fortement desséchée d'épaisseur variable n'excédant pas quelques cm, et recouvrant une

forme massive très hydratée. Pour le reste de la parcelle, l'horizon superficiel Aa s'est maintenu sur quelques cm jusqu'à 20 - 30 cm, recouvrant l'horizon Sa massif.

□ Distributions et paramètres statistiques

La construction d'histogrammes de fréquence des observations des différents paramètres permet d'en établir visuellement la nature des lois de distribution. On cherche simplement à vérifier que les variables étudiées présentent une dispersion faible et suivent des lois de distribution susceptibles d'autoriser l'utilisation de la moyenne arithmétique et de la variance comme estimateurs pour les comparer (figures III.14-15-16-17-18-19.). Ces graphes indiquent évidemment que le milieu est non uniforme pour l'ensemble des variables étudiées, mais également hétérogène puisque les modalités modifient nettement leur distribution.

La dispersion des paramètres observés, selon différentes modalités, est toujours faible (CV% généralement inférieur à 20) et caractéristique de variables d'état (VAUCLIN, 1982).

L'incidence des deux déterminants "Itinéraire de préparation de sol" et "Type d'horizon affleurant" est nette sur les trois variables étudiées, tant sur leur moyenne, que sur leur dispersion. Globalement, il apparaît que :

- Par rapport à la modalité "non labour", le labour diminue la taille moyenne des agrégats MWD et diminue sa variabilité, la stabilité S et la teneur en eau W% des agrégats sont peu influencées dans leurs moyennes ; leur variabilité augmente.
- Par rapport à la modalité "Aa affleurant", l'affleurement de l'horizon Sa occasionne une diminution de MWD et de S, en revanche W% est plus élevée. La variabilité de MWD est réduite, alors que S et W% présentent des dispersions très supérieures sur Sa.

Figure III.14. Histogrammes de fréquence des observations du paramètre MWD, réparties en classes (pas 0.05mm), selon deux modalités : horizon affleurant = Aa (N=64, moyenne=1.581, variance=5.94E-02) ; horizon affleurant = Sa (N=16, moyenne=1.364, variance=0.735E-02)

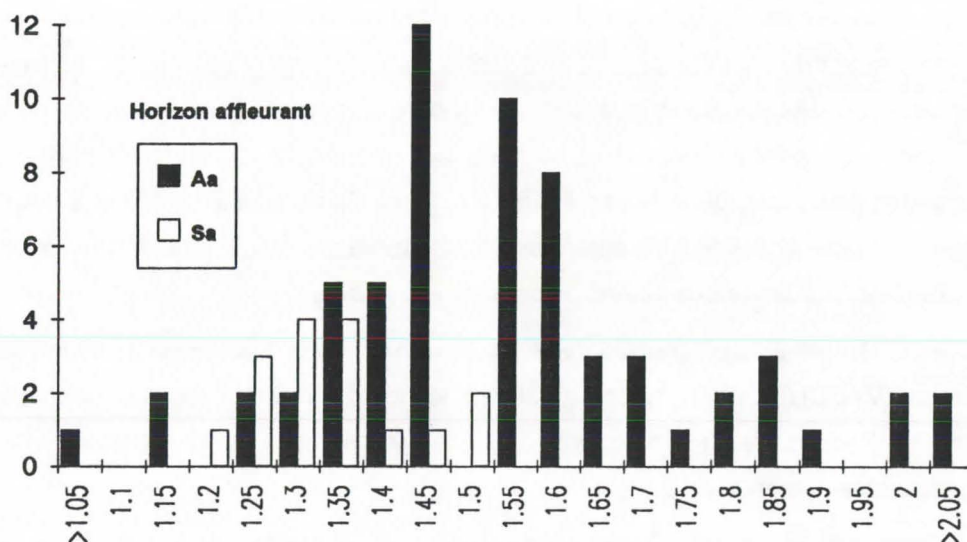


Figure III.15. Histogrammes de fréquence des observations du paramètre MWD, réparties en classes (pas 0.05mm), selon deux modalités : non labour (N=40, moyenne=1.558, variance=8.05E-02) ; labour (N=40, moyenne=1.516, variance=3.15E-02)

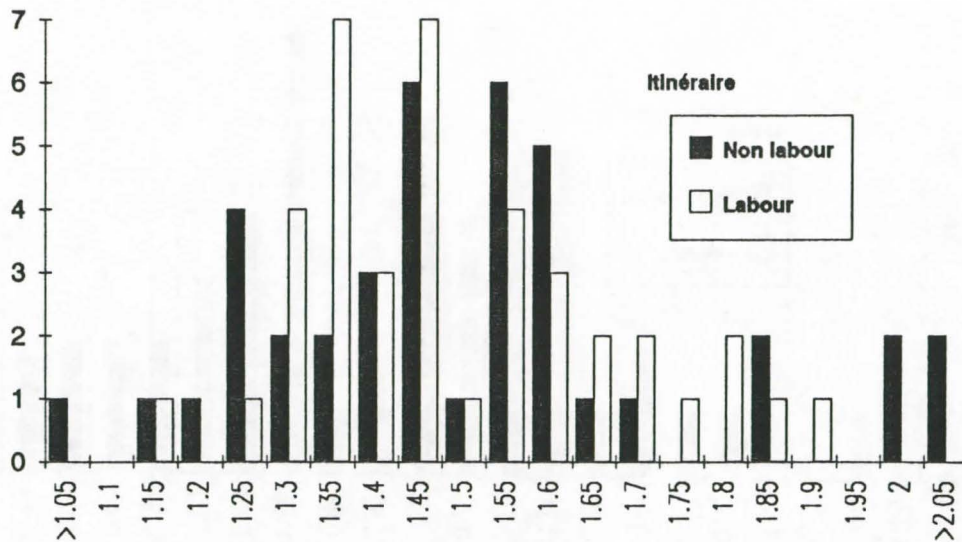


Figure III.16. Histogrammes de fréquence des observations du paramètre S, réparties en classes (pas 0.02) et bornées à 1, selon deux modalités : horizon affleurant = Aa (N=64, moyenne=0.875, variance=0.556E-02) et horizon affleurant = Sa (N=0.731, moyenne=x, variance=2.11E-02)

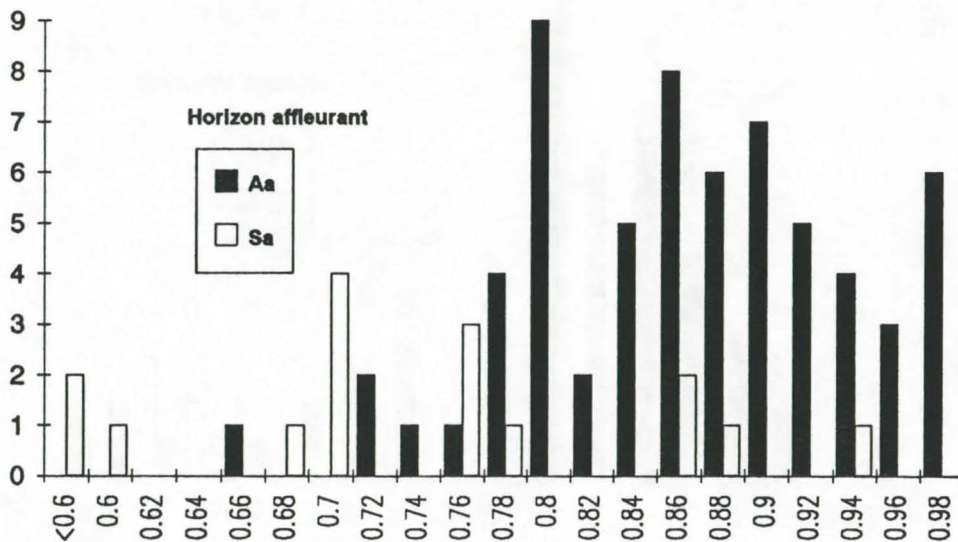


Figure III.17. Histogrammes de fréquence des observations du paramètre S, réparties en classes (pas 0.02) et bornées à 1, selon deux modalités : non labour (N=40, moyenne=0.846, variance=0.84E-02) ; labour (N=40, moyenne=0.847, variance=1.561E-02)

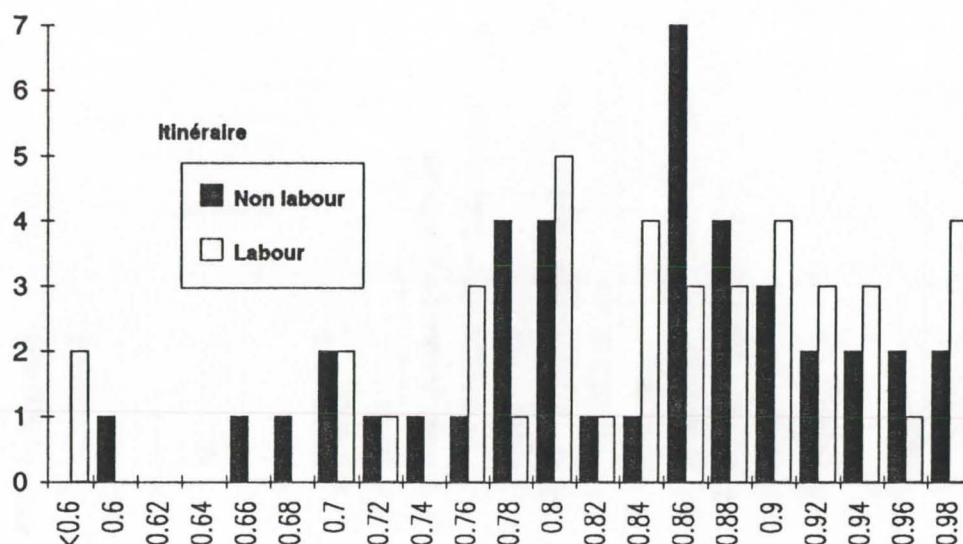


Figure III.18. Histogrammes de fréquence des observations du paramètre W%, réparties en classes (pas 2%), selon deux modalités : horizon affleurant = Aa (N=64, moyenne=61.62, variance=55.12) ; horizon affleurant = Sa (N=16, moyenne=74.21, variance=230.69)

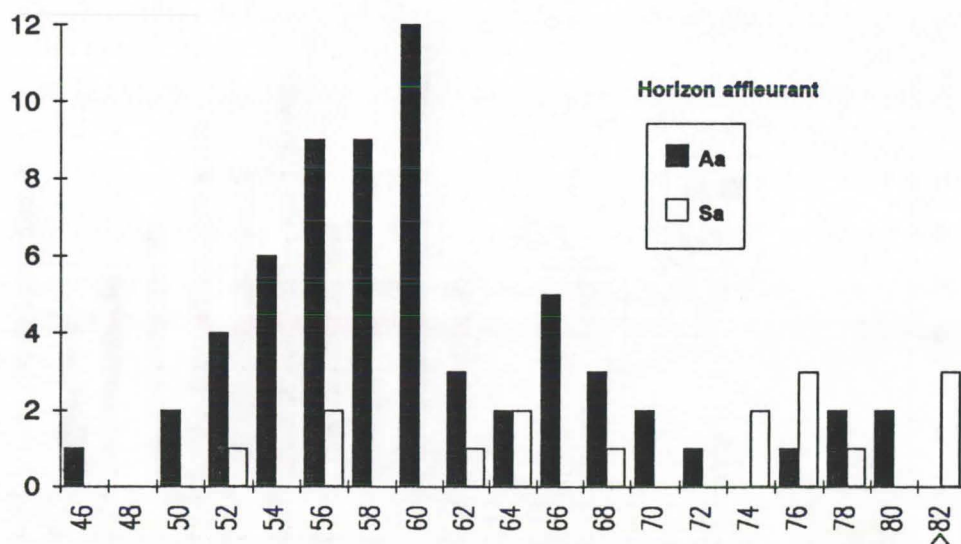
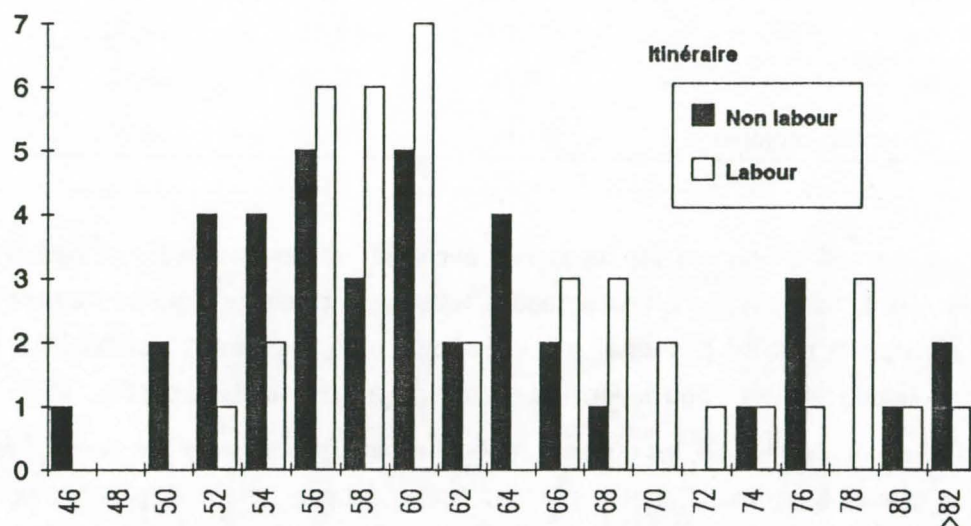


Figure III.19. Histogrammes de fréquence des observations du paramètre W%, réparties en classes (pas 2%), selon deux modalités : non labour (N=40, moyenne=62.67, variance=102.68) ; labour (N=40, moyenne=65.60, variance=124.18)



Si l'on découpe plus finement l'échantillonnage en croisant les modalités, on obtient les paramètres statistiques des figures III.20-21-22.

Tableau III.20. Paramètres statistiques de la taille moyenne des agrégats MWD selon 4 modalités :

Horizon affleurant	Labour	Moyenne	Ecart-type	C.V. %	N
Aa	non	1.621	0.295	18.2	31
Aa	oui	1.543	0.185	11.96	33
Sa	non	1.342	0.091	6.75	9
Sa	oui	1.393	0.083	5.98	7
Echantillon complet		1.537	0.238	15.45	80

Tableau III.21. Paramètres statistiques de l'indice de stabilité S des agrégats selon 4 modalités :

Horizon affleurant	Labour	Moyenne	Ecart-type	C.V. %	N
Aa	non	0.866	0.0794	9.17	31
Aa	oui	0.882	0.07	7.94	33
Sa	non	0.772	0.098	12.69	9
Sa	oui	0.677	0.1936	28.60	7
Echantillon complet		0.846	0.11	12.95	80

Tableau III.22. Paramètres statistiques de la teneur en eau pondérale W% des agrégats selon 4 modalités :

Horizon affleurant	Labour	Moyenne	Ecart-type	C.V.%	N
Aa	non	59.88	7.43	12.41	31
Aa	oui	63.25	7.27	11.49	33
Sa	non	72.26	13.15	18.20	9
Sa	oui	76.71	19.28	25.13	7
Echantillon complet		64.14	10.75	16.76	80

Ces résultats confirment les tendances décelées précédemment : quel que soit l'horizon, le labour homogénéise la taille moyenne des agrégats, celle-ci est diminuée significativement dans l'horizon Aa. Il semble diminuer la stabilité des agrégats sur Sa tout en augmentant la variabilité. Le labour semble occasionner partout une teneur en eau supérieure et en augmente la variabilité sur Sa.

Quel que soit l'itinéraire, les horizons Aa ont des agrégats de taille nettement plus importante et plus hétérogène que les horizons Sa, leur stabilité est également plus forte mais plus homogène. La teneur en eau des agrégats superficiels sur Sa est plus élevée et plus variable que sur Aa.

Schématiquement, il apparaît que le déterminant principal de la structure superficielle à l'échelle parcellaire (taille, stabilité, teneur en eau) est le type d'horizon affleurant, le travail du sol jouant un rôle important en diminuant significativement la taille des agrégats les plus gros (Aa) et en réduisant la stabilité des agrégats les plus petits (Sa). Rappelons que ces résultats concernent le matériau superficiel affleurant (0 - 10 cm). Leurs implications agronomiques sont donc de faible portée, d'autant que les différences observées, même si elles sont significatives statistiquement, ne sont peut-être pas capitales au plan comportemental. Elles peuvent cependant s'avérer essentielles à long terme, compte tenu de la rapidité d'évolution de ces matériaux et au plan des comportements hydrodynamiques et structuraux liés aux processus d'érosion.

□ Structure de variabilité des paramètres superficiels

La structure de variabilité spatiale des paramètres superficiels est étudiée par variographie : globalement, on étudie la variance de groupes de points séparés par une distance donnée et indépendamment de la position spatiale de ces couples, comparée à la variance de l'ensemble de l'échantillon, pour révéler la nature de la variation géographique de la propriété étudiée (BURGESS et WEBSTER, 1980).

La propriété Z localisée dans l'espace par ses coordonnées (x,y,z) est assimilée à une Fonction Aléatoire. Z prend pour valeur $z(x)$ au point x (notation vecteur). Si on possède N données de Z, on forme :

$$N(N-1)/2 = n \text{ couples de points}$$

Les n couples sont répartis en classes, comprenant n_h couples séparés par la distance h. Pour chaque classe, on calcul la semi-variance $\Gamma(h)$, indépendante de la coordonnée x. En d'autres termes, la relation entre les paires de points à des intervalles h peut être exprimée comme la variance des différences entre toutes ces paires. La variance par observation entre les paires représente la moitié de cette valeur.

Le variogramme (semi-variogramme) est le graphe de la fonction :

$$\Gamma(h) = 1/2 \text{var}\{z(x) - z(x+h)\}$$

Cette semi-variance est une mesure de similitude, en moyenne, entre les points distants de h . Plus les points sont semblables, plus $\Gamma(h)$ est réduite. A partir de données expérimentales, il est possible d'estimer la quantité $\Gamma(h)$ pour les valeurs entières de h (pas), cette estimation $\Gamma^*(h)$ est la moyenne arithmétique des différences au carré entre deux mesures expérimentales $[z(x_i), z(x_i+h)]$ pour toutes les n_h paires de points distants de h (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978) :

$$\Gamma^*(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} \{z(x_i) - z(x_i+h)\}^2$$

La valeur de n_h doit dépasser la cinquantaine de couples d'observations pour que l'estimation $\Gamma^*(h)$ soit correcte. Le graphe représenté (appelé semi-variogramme ou variogramme) est normé en variance : les valeurs du semi-variogramme sont divisées par la variance des échantillons complets, celle-ci est tracée avec la valeur 1. Le logiciel utilisé pour l'ensemble des calculs est GEOSTAT-PC (BOIVIN, 1988).

Les paramètres étudiés sont la taille moyenne des agrégats (MWD), l'indice de stabilité de ces agrégats (S), leur teneur en eau W . Les prélèvements ont concerné la zone superficielle (entre 0 et 10 cm de profondeur).

Les variogrammes (figures III.23-24-25.) fournissent les indications suivantes :

Dans le cas de MWD, la distribution spatiale ne présente pas de dérive (anisotropie : variation tendancielle des valeurs selon une direction) et semble purement aléatoire quel que soit l'échantillon étudié (dès le pas minimum choisi $-h = 4$ m-, la variance est atteinte, ou très proche) et à l'échelle parcellaire étudiée. Si la variance calculée sur l'ensemble de la parcelle ne semble pas dépendre de la prise en compte des points sur zones érodées (Sa affleurant), les variances sont très différentes entre zones labourées ou non.

Dans le cas de S, la distribution des données semble également aléatoire pour la zone non labourée ou pour l'ensemble de la parcelle hormis les points sur Sa. Pour les deux autres cas (ensemble de la parcelle et zone labourée), les variogrammes ne sont pas bornés et les semi-variances dépassent largement la norme 1 pour les points de distance élevée, indiquant une dérive des valeurs expérimentales qui deviennent tributaires de leur position géographique (évolution tendancielle). L'étude des variogrammes directionnels ne permet pas de définir de dérive directionnelle précise. A l'échelle de la parcelle, la direction de dérive maximale observée, globalement d'axe x , correspondant à la direction générale d'une pente légère. Il est difficile d'interpréter ce type de variogramme non borné (VOLTZ, 1986). Soit on se situe dans le cas d'une dérive, soit le variogramme est borné mais l'échelle d'étude ne permet pas de mettre en évidence de palier, soit la variance est infinie et son estimation dépend donc de l'échelle d'étude.

En tout état de cause, l'aplanissement net du variogramme après élimination des points sur Sa montre l'incidence du type d'horizon affleurant sur la structure de variabilité de la stabilité des agrégats. Le type d'horizon affleurant peut déterminer cette dérive.

Figure III.23. Semi-variogrammes normés du paramètre MWD, calculés sur 4 échantillons :

1 : ensemble de la parcelle (80 points) $s^2=5.643E-02$

2 : ensemble de la parcelle sauf points sur Sa (64 points) $s^2=5.937E-02$

3 : zone non labourée (40 points) $s^2=8.046E-02$ / 4 : zone labourée (40 points) $s^2=3.153E-02$

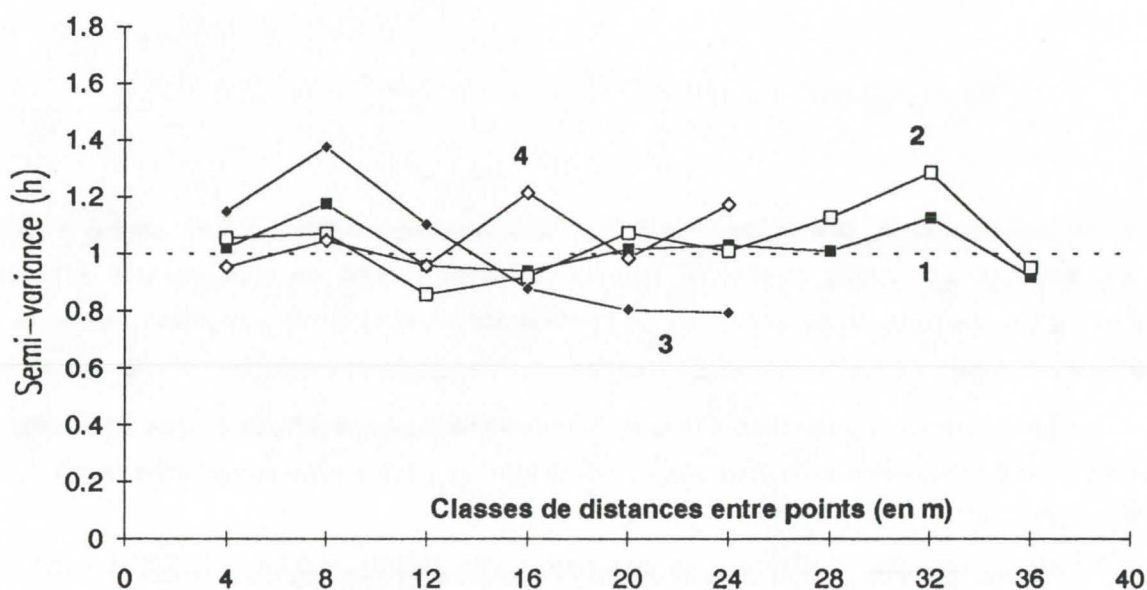
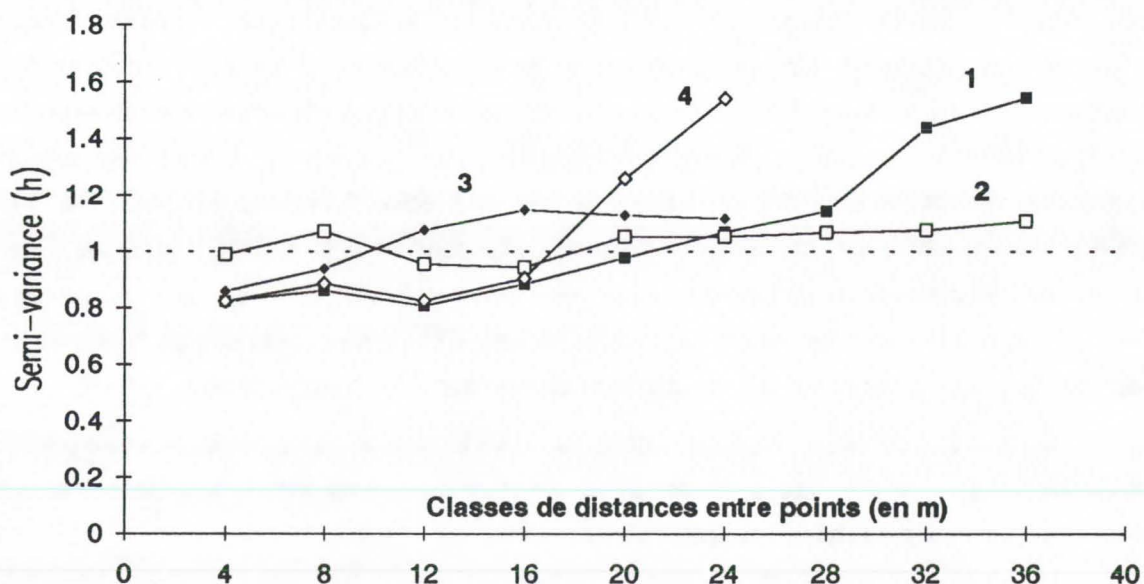


Figure III.24. Semi-variogrammes normés du paramètre S, calculés sur 4 échantillons :

1 : ensemble de la parcelle (80 points) $s^2=1.2E-02$

2 : ensemble de la parcelle sauf points sur Sa (64 points) $s^2=0.556E-02$

3 : zone non labourée (40 points) $s^2=0.84E-02$ / 4 : zone labourée (40 points) $s^2=1.561E-02$



Dans le cas de W%, les semi-variances augmentent avec la distance entre points, l'étude des variogrammes ou de l'évolution directionnels des valeurs expérimentales met en évidence une dérive selon l'axe x, correspondant à la direction générale d'une pente légère. L'évolution progressive des faciès pédogénétiques peut occasionner une dérive progressive des valeurs expérimentales.

En conclusion, on notera :

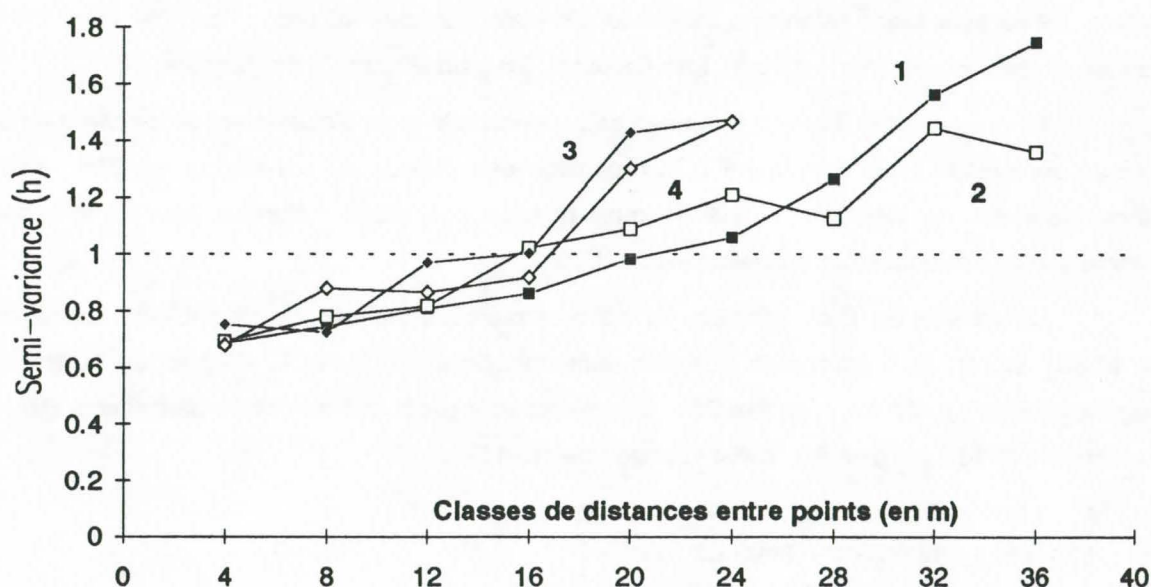
- l'absence d'autocorrélation très marquée entre points de mesure pour les différents paramètres, à l'échelle de la parcelle et pour chaque classe de distance h, y compris les plus faibles (4 m) les semi-variances ne sont pas très différentes de la variance de l'échantillon,
- la distribution aléatoire des valeurs de MWD, ce paramètre pourrait être très dépendant de caractéristiques extrinsèques au matériau (itinéraires techniques...),
- une certaine dérive spatiale des paramètres S et W%, qui pourraient être principalement dépendants de l'évolution directionnelle de caractéristiques intrinsèques au sol (type de matériau...).

Figure III.25. Semi-variogrammes normés du paramètre W%, calculés sur 4 échantillons :

1 : ensemble de la parcelle (80 points) $s^2=115.58$

2 : ensemble de la parcelle sauf points sur Sa (64 points) $s^2=55.12$

3 : zone non labourée (40 points) $s^2=102.68$ / **4 :** zone labourée (40 points) $s^2=124.18$



□ Interactions entre variables

L'étude de la distribution des paramètres et de leur structure de variabilité dans un contexte non uniforme et hétérogène montre que l'on ne peut élaborer de modèles déterministes globaux d'interaction entre variables, d'autant que l'on connaît souvent mal les processus -cause ou effet- liant deux paramètres.

Les représentations deux à deux des différentes variables sous formes numériques (graphes, figures III.27-28-29-30-31-32.), puis qualitatives (tableau de Burt et tests non paramétriques "*distribution-free*", DAGNELIE, 1975 ; figure III.26.) permettent cependant une analyse descriptive, apte à qualifier des

types d'agrégats selon les déterminismes parcellaires "horizon affleurant" et "itinéraire de préparation du sol".

Concernant la taille des agrégats et leur stabilité, il n'apparaît pas de relation nette entre les deux variables, sauf sur l'horizon Sa affleurant et non remanié où les agrégats les plus stables sont les plus petits. On observe l'effet d'homogénéisation du labour sur la taille des agrégats, le nuage de points est comprimé vers des valeurs plus faibles et surtout plus homogènes (figure III.27).

On n'observe pas de relation nette entre la teneur en eau des agrégats et leur taille ou leur stabilité. Le décalage des nuages de points sur Aa et LAa confirme une relation entre labour et teneur en eau. D'une part, le remaniement profond du sol qui a précédé les mesures a amené en surface du matériau plus humide que les agrégats en place soumis aux contraintes bioclimatiques, d'autre part des morceaux de matériau profond Sa ont pu être remontés, ils présentent des teneurs en eau élevées avant de subir une dessiccation bioclimatique progressive (figures III.28-29.).

Le taux de carbone organique du matériau apparaît lié à la taille des agrégats et à leur stabilité. Aux agrégats les plus grossiers correspondent des teneurs en carbone plus élevées, aux agrégats les moins stables correspondent des teneurs en carbone faibles. Cette relation est plus nette dans le cas où l'horizon Sa affleure (figure III.30-31.).

Si l'on relie la teneur en eau pondérale superficielle W% à la masse volumique apparente sèche γ_d mesurée dans le matériau juste sous-jacent (5 - 15 cm), on observe une distribution des nuages de modalités qui se succèdent selon une tendance générale inversement proportionnelle, avec dans l'ordre d'humidité croissante : Aa (non labouré), LAa (labouré), Sa (non labouré), LSa (labouré).

Le graphe indique que la teneur en eau superficielle reste globalement dépendante de la masse volumique du matériau, conformément à la répartition des phases du sol décrite en 2^{ème} partie et aux observations *in-situ* de VAKSMANN (1987), mais que les opérations culturales peuvent influencer cette répartition dans les couches superficielles (figure III.32.).

Un tableau de Burt (effectifs par classes croisées : ensemble de tableaux de contingence, figure III.26.) est établi à partir des données numériques (MWD, S, W%, C%) réparties en 3 classes homogènes (faible ; n=27 - moyen ; n=27 - fort ; n=26) et à partir des modalités parcellaires (non-labour ; n=40 - labour ; n=40 / horizon Aa ; n=64 - horizon Sa ; n=16) :

MWD : M1 : 1.091-1.419mm / M2 : 1.419-1.593 / M3 : 1.593-2.557

S : S1 : 0.33-0.812 / S2 : 0.812-0.899 / S3 : 0.899-1

W% : W1 : 46.91-58.48 / W2 : 58.48-65.65 / W3 : 65.65-116.19

C% : C1 : 5.07-7.45 / C2 : 7.45-8.09 / C3 : 8.09-10.28

Itinéraire : L0 : non-labour / L1 : labour

Horizon : Aa / Sa

Figure III.26. Tableau des effectifs par classes croisées (contingences).

	M1	M2	M3	S1	S2	S3	W1	W2	W3	C1	C2	C3	L0	L1	Aa	Sa
M1	27															
M2	0	27														
M3	0	0	26													
S1	13	9	5	27												
S2	8	8	11	0	27											
S3	6	10	10	0	0	26										
W1	8	12	7	7	8	12	27									
W2	10	9	8	6	11	10	0	27								
W3	9	6	11	14	8	4	0	0	26							
C1	12	10	5	12	5	10	12	7	8	27						
C2	10	8	9	9	10	8	8	11	8	0	27					
C3	5	9	12	6	12	8	7	9	10	0	0	26				
L0	12	14	14	15	14	11	17	13	10	11	16	13	40			
L1	15	13	12	12	13	15	10	14	16	16	11	13	0	40		
Aa	15	23	26	15	24	25	24	24	16	19	22	23	31	33	64	
Sa	12	4	0	12	3	1	3	3	10	8	5	3	9	7	0	16

Au plan statistique, le calcul des χ^2 de contingence (variables prises deux à deux) indique que seuls les couples de variables W% - C% ; itinéraire - MWD ; itinéraire - S et itinéraire - W% sont significativement interdépendantes (hypothèse d'indépendance rejetée au seuil 95%).

Les tendances soulignées par ce tableau sont :

- l'affleurement de l'horizon Sa affecte l'ensemble des paramètres étudiés,
- les caractéristiques en sont : des agrégats de petite taille, peu stables, très humides et de faible teneur en carbone organique,
- dans l'horizon Aa affleurant, les agrégats ont les qualités inverses,
- le labour ne semble influencer nettement que la teneur en eau des agrégats, plus élevée,
- indépendamment de ces modalités, les agrégats les plus petits sont également les moins stables et les plus pauvres en carbone.

Figure III.27. Représentation de l'indice de stabilité S des agrégats en fonction de leur taille MWD, selon les types d'horizon affleurant et l'itinéraire de préparation du sol.

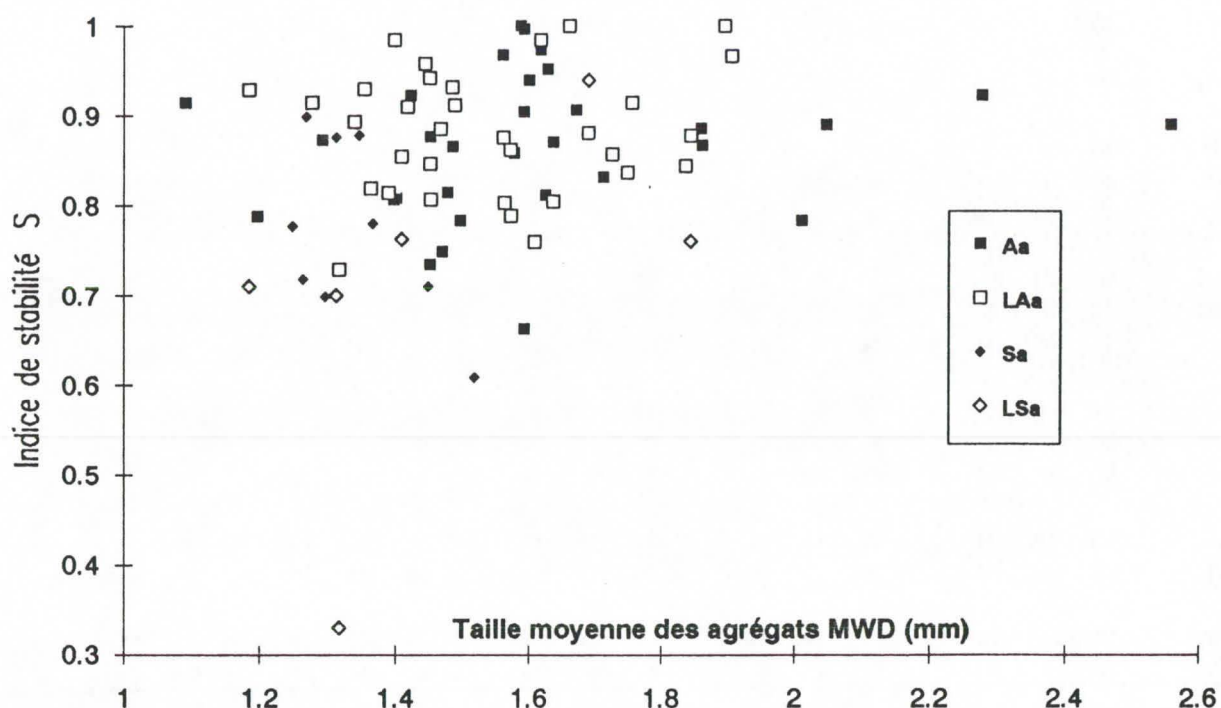


Figure III.28. Représentation de la teneur en eau pondérale W% des agrégats en fonction de leur taille MWD, selon les types d'horizon affleurant et l'itinéraire de préparation du sol.

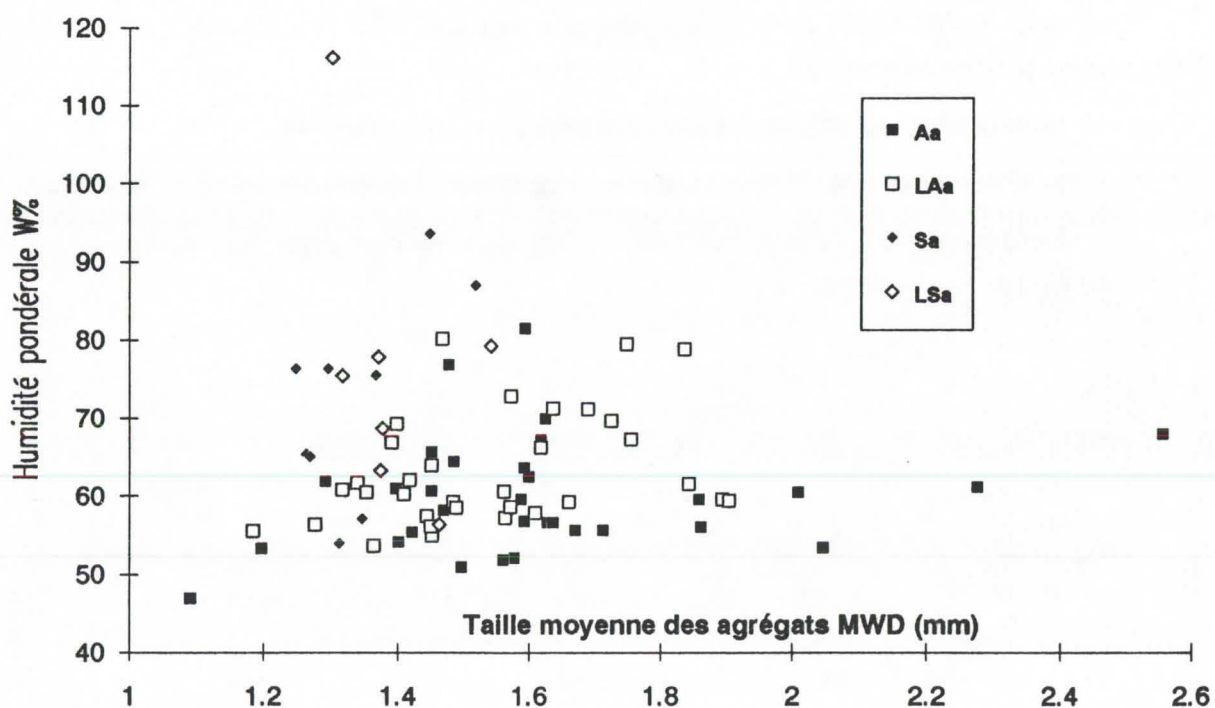


Figure III.29. Représentation de la teneur en eau pondérale W% des agrégats en fonction de leur stabilité S, selon les types d'horizon affleurant et l'itinéraire de préparation du sol.

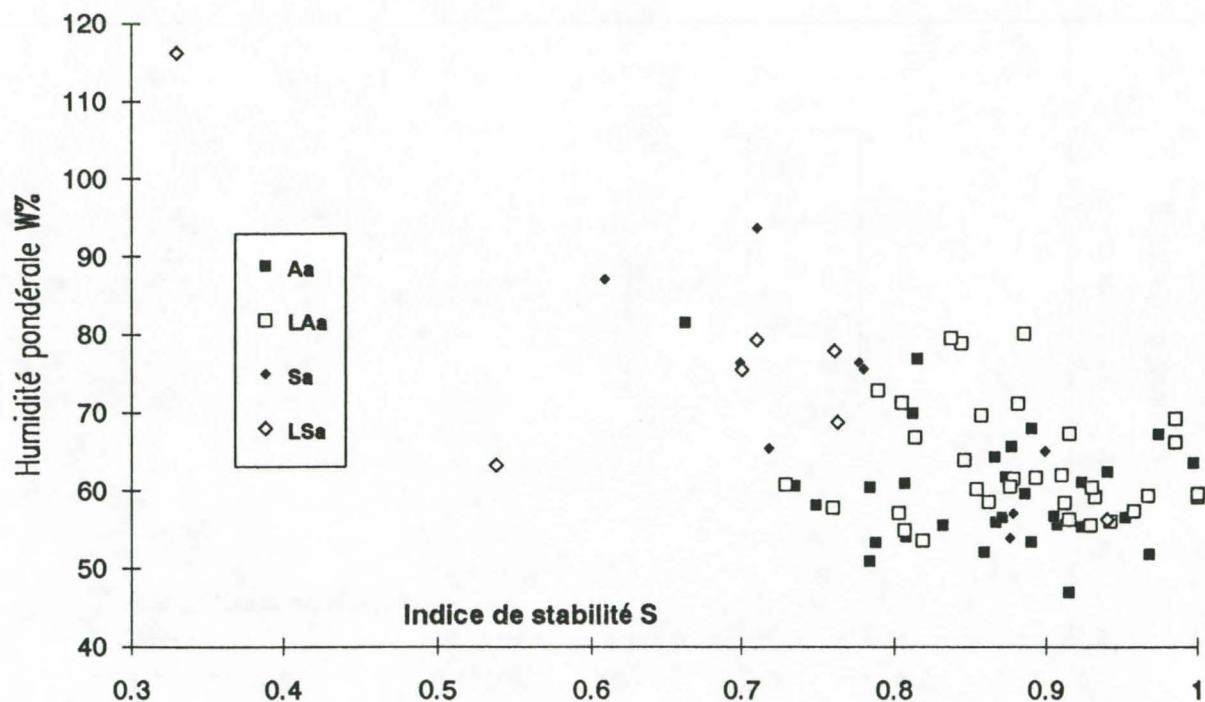


Figure III.30. Représentation de la teneur en carbone organique C% du sol en fonction de la taille MWD des agrégats, selon les types d'horizon affleurant et l'itinéraire de préparation du sol.

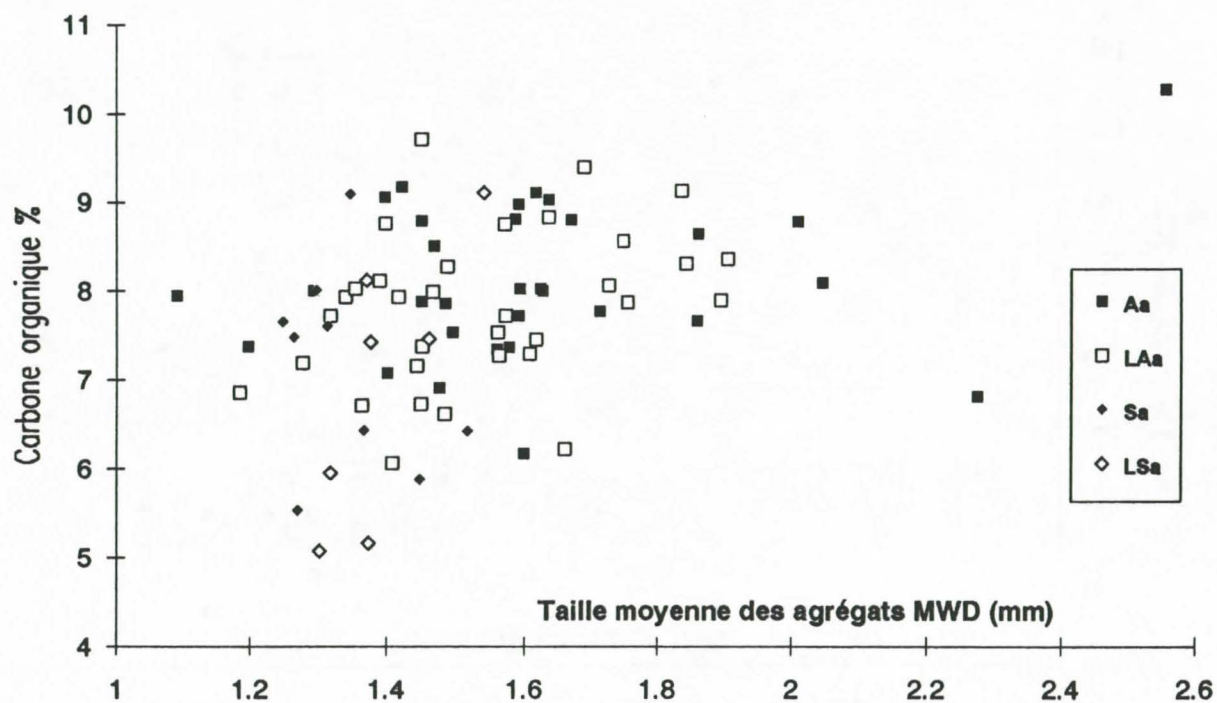


Figure III.31. Représentation de la teneur en carbone organique C% du sol en fonction de la stabilité S des agrégats, selon les types d'horizon affleurant et l'itinéraire de préparation du sol.

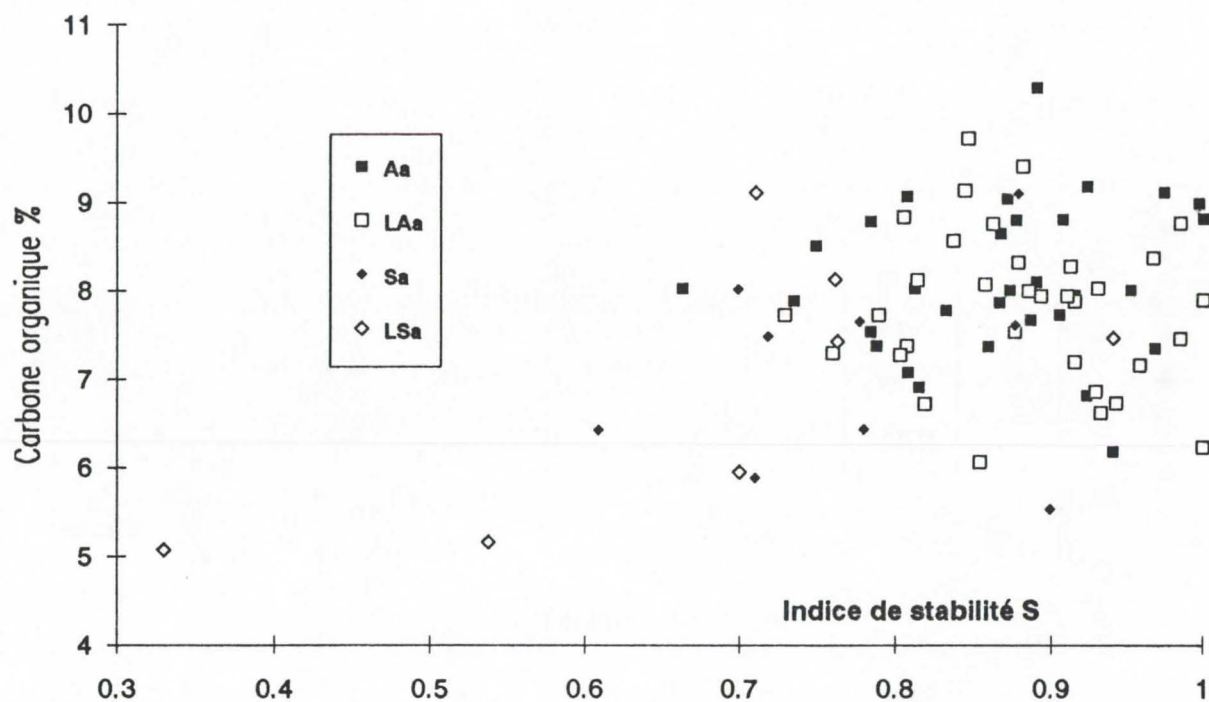
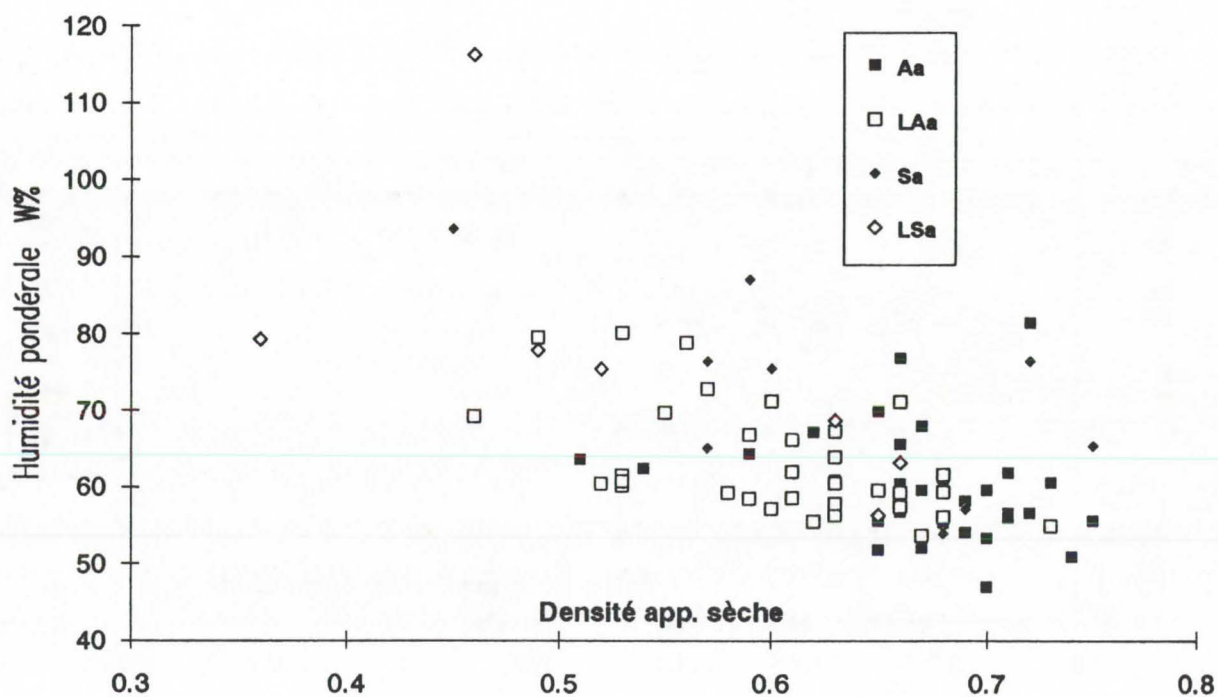


Figure III.32. Représentation de la teneur en eau pondérale W% des agrégats en fonction de la masse volumique apparente du matériau sous-jacent (5 - 15 cm), selon les types d'horizon affleurant et l'itinéraire de préparation du sol.



3. Etat structural et fonctionnement hydrodynamique des horizons culturaux

3.1. Sites d'étude

L'objectif est d'étudier les dynamiques de ruissellement et d'infiltration ainsi que l'évolution structurale sous l'effet des pluies pour différents types d'horizons culturaux caractéristiques des zones d'altitude sur andosols désaturés non perhydratés.

Les essais ont été conduits sur les stations expérimentales CIRAD de Trois Bassins - Cocâtre et Fond Jardin. Les types d'horizons culturaux choisis ainsi que les itinéraires techniques pratiqués sont exposés sur le tableau III.33.

Aux dates de réalisation des essais (septembre-octobre), les parcelles présentent des taux de couverture très diverses :

- sur KB, le kikuyu couvre intégralement le sol ;
- sur GA, le géranium est relativement dégradé (itinéraire traditionnel non intensif, flétrissement, âge des plants), la couverture du sol est d'environ 30% ;
- sur MHA, MHAL, MHB et MHL, le haricot déjà récolté est en place mais commence à sécher sur pied, le taux de couverture de surface est hétérogène (10 à 20%) et prend en compte les quelques adventices présentes. Pour les simulations, ces plants sont coupés aux ciseaux à raz du sol et éliminés, la couverture est donc nulle.

3.2. La simulation de pluie

3.2.1. Intérêts

Cette technique permet d'observer les phénomènes à étudier sur une durée limitée, de façon reproductible et donc de pouvoir comparer les comportements de plusieurs sites (CASENAVE, 1986). Les paramètres déterminants étant difficilement discernables lorsqu'on travaille sous pluies naturelles (COLLINET et VALENTIN, 1979). Au plan structural et hydrodynamique, on compare avant tout l'évolution des horizons superficiels (détachabilité, processus de transferts, de réorganisation) et leur fonctionnement sans pouvoir pour autant extrapoler des pertes en terre ou élaborer un bilan hydrique de surface à l'échelle parcellaire puisque la surface élémentaire étudiée (1m²) ne permet pas de prendre en compte des facteurs globaux (pente, longueur des parcelles, chemins d'eau...).

La simulation de pluie permet cependant de mesurer le couple infiltration / ruissellement dans des conditions quasi naturelles, en prenant en compte en particulier les états de surface et leur évolution : incidences des réorganisations superficielles sous l'impact des gouttes de pluies, effets de la couverture végétale et de la rugosité superficielle. On a accès à des paramètres liés à l'infiltrabilité intrinsèque du sol par l'infiltrométrie à succion contrôlée, mise en oeuvre sur les mêmes sites.

Tableau III.33. Parcelles étudiées sous pluie simulée : type de matériau affleurant et itinéraires techniques.

Nom de la parcelle :	Horizon affleurant :	Itinéraire technique schématique :
KB	Sa dégradé particulaire sur quelques cm puis Sa	Kikuyu (<i>Pennisetum clandestinum</i>) fauché, fumure minérale d'entretien, couverture du sol : 90 à 100%.
GA	Aa profond (20 cm) dégradé (st. particulaire fine) puis Sa.	Géranium planté en ligne (au trou, 80x25cm), interligne sarclé, densité 45 à 50.10 ³ pieds/ha, apport de compost à la plantation puis fumure minérale, couverture du sol : 30 à 70%.
MHA	Aa profond bien structuré (st. grumeleuse grossière) sur 20cm puis Sa frais massif.	Rotation haricot-maïs, 2 cycles/an, plantation en ligne (interligne : 70cm), sillonage mécanisé puis plantation manuelle après apport de compost au sillon, fin de cycle de haricot lors de l'essai (récolte en septembre) couverture du sol : 20 à 30%.
MHAL	Aa profond structuré avec blocs de Sa massif frais en mélange sur 30 à 40 cm, puis Sa frais massif.	Idem MHA sauf labour à la charrue à socs avant sillonage, réalisé en mars (avant semis haricot)
MHB	Très hétérogène, Sa dégradé particulaire sec sur 10 à 20 cm, passant localement à Aa dégradé, puis Sa massif, nombreux blocs de tuf dans le profil (zone colluvionnée).	Idem MHA
MHBL	Sa dégradé sec et particulaire sur 30-35 cm en mélange avec des blocs de Sa massif frais, puis Sa massif frais.	Idem MHAL

3.2.2. Matériel

L'infiltromètre à aspersion utilisé (Figure III.34.) est un mini-simulateur de pluie de type ORSTOM modifié (ASSELINE, 1981 ; CASENAVE, 1982).

Il se compose d'un bâti démontable supportant un mécanisme qui fait décrire un mouvement de balancier à un gicleur (buse miroir). Celui-ci émet des gouttes d'eau de taille et d'énergie cinétique voisines de celles de pluies naturelles. Le réglage de l'angle d'oscillation contrôle la surface arrosée (3.5 à 14 m²), l'intensité incidente sur la parcelle élémentaire de 1 m² dépend donc de cet angle.

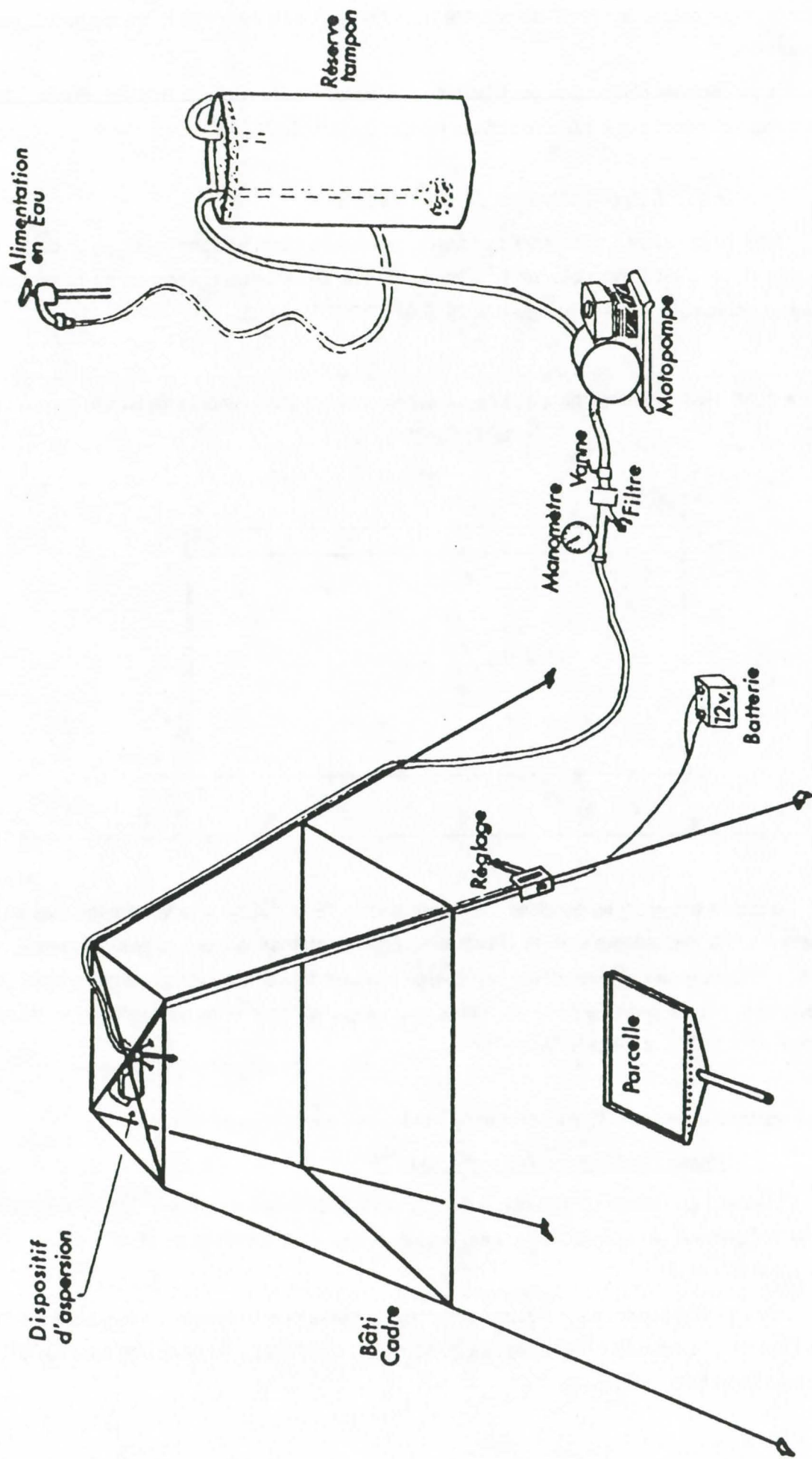


Figure III.34. Dispositif de simulation de pluie

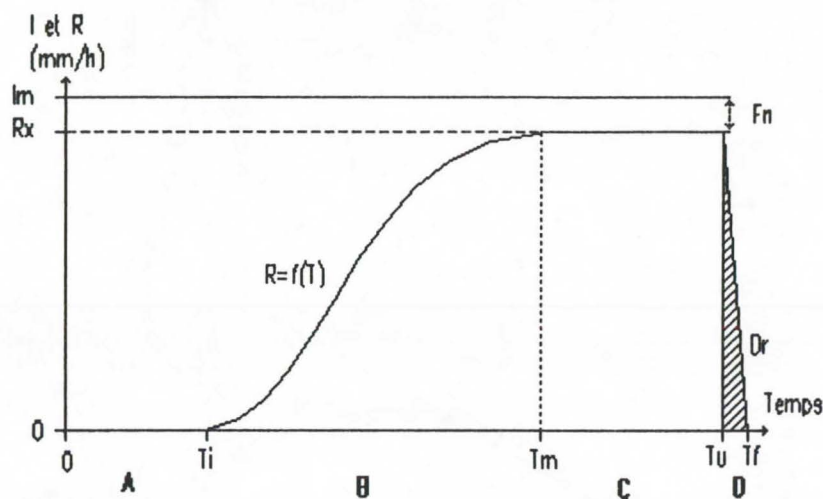
Les parcelles sont délimitées par un cadre métallique enfoncé de 10 cm dans le sol (figure III.34.). A l'aval de ce cadre, une gouttière collecte les eaux de ruissellement et la charge solide, recueillies dans des bouteilles.

Le mécanisme d'aspersion est fabriqué sur plan ORSTOM (Société BOUBY, France), le bâti et l'ensemble du matériel connexe a été construit par l'atelier du CIRAD-CEEMAT de la Réunion.

3.2.3. L'hydrogramme de ruissellement

Sous pluie simulée d'intensité constante, la mesure répétée dans le temps T de la quantité d'eau ruisselée R , récoltée à l'exutoire de la parcelle, permet d'établir un hydrogramme répondant à des caractéristiques connues, précisées en figure III.35. (LAFFORGUE, 1977).

Figure III.35. Hydrogramme théorique de ruissellement sous pluie simulée d'intensité constante (LAFFORGUE, 1977)



Le temps est porté en abscisse avec pour origine T_0 , début de la pluie simulée. Les intensités de précipitation I , de ruissellement R et d'infiltration F sont portées en ordonnées. L'intensité I étant constante, le hyétogramme de l'averse est représenté par une droite. L'évolution de la turbidité (charge solide C évacuée par le ruissellement) au cours du temps s'inscrit dans les différentes phases de l'hydrogramme (COLLINET et VALENTIN, 1979).

□ Les quatre phases de l'hydrogramme, incidences sur la charge solide

Phase d'imbibition : $R=0$, entre T_0 et T_i

L'intensité potentielle d'infiltration est supérieure à l'intensité de pluie incidente sur l'ensemble de la parcelle, localement, la capacité d'infiltration devient inférieure à l'intensité de pluie, il y a remplissage de dépressions et flaquage.

Lors de cette phase, il y a désagrégation d'une partie des structures construites sous l'impact des gouttes ("splash", composante C_{sp} de la charge solide) et mobilisation de particules meubles d'origines diverses (composante C_{st} , stock initial).

Phase transitoire : R croissant, entre T_i et T_m

Au temps T_i , les flaques débordent, ou plus globalement, l'intensité d'infiltration est inférieure à l'intensité de pluie, le ruissellement R se déclenche et arrive à l'exutoire. L'intensité de ruissellement augmente alors que l'infiltration diminue, elle se stabilise lorsque la capacité de stockage de toutes les dépressions est atteinte et que la totalité de la surface participe au ruissellement.

La charge solide C augmente, il y a décharge de C_{st} et C_{sp} ainsi qu'abrasion de la surface par la lame d'eau ruisselée : C_n . Cette composante constitue l'érosion proprement dite du matériau. C_{st} et C_{sp} s'épuisent progressivement, alors que C_n augmente par élévation de l'énergie de ruissellement (compétence).

Régime permanent : R constant

Au temps T_m , l'infiltration atteint une valeur minimale F_n , un palier de ruissellement R_x est atteint, il se maintient jusqu'à l'arrêt de la pluie, $R_x = I - F_n$.

Pendant cette phase, le matériau superficiel devient stable à l'effet "splash", C_{sp} s'annule. Généralement, la charge C est constituée uniquement de la composante C_n , selon le matériau, elle se stabilise (érosion régressive entre les structures construites d'un matériau meuble) ou diminue progressivement.

Phase de vidange : R décroissant

Au temps T_u d'arrêt de la pluie, il y a vidange des réserves superficielles mobilisables par infiltration et ruissellement. La lame d'eau ruisselée entre T_u et T_f ($R=0$) est appelée détention superficielle récupérable (D_s).

La compétence du ruissellement diminuant, il y a dépôt de certaines particules en cours d'évacuation, elles constitueront la composante C_{st} de l'averse suivante.

□ Variables caractérisant l'hydrogramme (LAFFORGUE et NAAH, 1976)

Les variables de précipitations :

I (mm) : intensité moyenne de l'averse

P_u (mm) : précipitation totale de durée T_u ($P_u = I \cdot T_u$)

P_i (mm) : précipitation limite de ruissellement, appelée également pluie d'imbibition, elle caractérise la phase d'imbibition de durée T_i , durant laquelle le ruissellement reste nul ;

P_e (mm) : pluie efficace, déclenchant le ruissellement de durée T_e , ($T_u = T_i + T_e$)

Les variables du régime permanent : ce sont les variables du ruissellement.

R_x : intensité maximale de ruissellement (mm/h),

F_n : infiltration minimale (mm/h), $F_n = I - R_x$

L_r : la lame d'eau totale ruisselée (mm),

D_s (mm) : détention superficielle récupérable,

K_r (%) : coefficient de ruissellement global, $K_r = (L_r / P_u) \cdot 100$.

3.2.4. Observations complémentaires

Pour chaque couple matériau - itinéraire, 2 ou 3 répétitions ont été réalisées, sans prétention d'évaluer la variabilité spatiale des paramètres mesurés. Chaque essai est constitué d'une seule averse d'intensité constante proche de 50 mm/h. Cette valeur correspond à l'intensité moyenne des pluies les plus agressives de début et de fin de saison humide (DURET, 1982). Sur parcelles de Wischmeier, ces averses entraînent de plus fortes pertes en terre que les épisodes cycloniques, en particulier lorsqu'elles surviennent après un sarclage, un travail du sol ou une récolte de pommes de terre.

Concernant l'averse simulée, aucune limite de durée T_u n'a été fixée par avance. Le palier de ruissellement est recherché (avec R_x jugé suffisamment stable), permettant de définir les caractéristiques R_x , F_n , L_r ...

Compte tenu du nombre réduit de situations étudiées, de simulations réalisées (16), de ruissellement observés (8), il n'est pas possible d'exploiter les données obtenues par la statistique. Seuls des comportements peuvent être mis en évidence.

Sur la parcelle élémentaire de 1 m², seule l'érosion en nappe peut être étudiée, elle intègre d'une part, les processus de rejaillissement dûs à l'impact des gouttes de pluie ("splash"), d'autre part, le transport par ruissellement des particules détachées. La longueur de pente réduite ne permet pas au ruissellement, diffus et de faible énergie cinétique, de générer des rigoles. Cependant, en cas d'averse tombant sur des matériaux grossiers et ameublés, on peut observer entre les mottes, une érosion régressive et la formation de micro-ravines. L'érosion en nappe est peu spectaculaire, elle conduit à des réorganisations superficielles qui constituent les prémices d'autres phénomènes plus abrasifs (ROOSE, 1984).

3.3. Mesures connexes

De nombreuses études réalisées par des chercheurs ORSTOM, principalement en Afrique de l'ouest sub-sahélienne, ont permis de déterminer les facteurs initiaux principaux qui influencent les variables hydrodynamiques mesurées sous pluies simulées. Sur chaque parcelle d'essai, des mesures complémentaires ont été réalisées avant et après l'aspersion, afin de définir les conditions initiales susceptibles d'influencer ces fonctionnements ou d'être modifiées par la pluie incidente.

Ainsi, la pluie d'imbibition P_i est positivement corrélée à la rugosité du sol, la couverture végétale qui limite la formation d'organisation pelliculaire de surface (OPS) (LAFFORGUE, 1977).

Elle est corrélée négativement à la teneur en eau initiale du sol (TREVISAN, 1986), l'intensité de pluie (LAFFORGUE, 1977).

Les variables du ruissellement proprement dit (R_x , F_n , L_r et K_r) sont positivement corrélées à l'intensité de pluie et la teneur en eau initiale du sol, ces facteurs prédominants masquent souvent l'influence importante du taux de couverture végétale, du travail du sol (structure et rugosité superficielles) ou plus simplement de la nature du matériau (LAFFORGUE et NAAH, 1976 ; LAFFORGUE, 1977).

3.3.1. Humidimétrie

Une mesure gravimétrique de la teneur en eau pondérale W est réalisée sur des échantillons prélevés dans la zone superficielle de l'horizon cultural (0-5 cm).

3.3.2. Granulométrie d'agrégats

La quantification de l'état structural superficiel a été réalisée par la détermination de la répartition dimensionnelle pondérale d'agrégats et de leur stabilité, effectuée selon le protocole décrit au chapitre 2.2. MWD et S ont été mesurés :

- sur des échantillons prélevés entre 0 et 5 cm aux abords immédiats (état initial) ou sur la parcelle d'essai (état final),
- sur la charge solide évacuée des parcelles lors du ruissellement et recueillie.

3.3.3. Aspérimétrie (rugosimétrie)

L'appareillage proposé par ASSELINE et *al.* (1987) est constitué d'un cadre amovible s'adaptant sur le cadre de la parcelle élémentaire. Deux des cotés opposés sont perforés de 19 trous chacun, un tous les 5 cm. Sur ce cadre s'adapte un bâti-potence amovible que l'on déplace en m sections j (19) dans le sens des côtés perforés, il sert de guide à n aiguilles i (19) repérées, distantes de 5cm (d) dont la base s'applique sur le sol, 361 points d'altitude relative sont ainsi mesurés (on note pour chaque aiguille la différence de dénivelé par rapport à un niveau de référence).

Ce dispositif permet de déterminer un indice de tortuosité directionnelle (BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1976), IR% tel que :

$$IR\% = (L - L_0 / L_0) * 100$$

L_0 représente l'ensemble des sections j de référence (linéaires : différences d'altitude nulles entre aiguilles i) :

$$L_0 = m (n - 1) d = 1710$$

L est une somme de l'ensemble des ondulations calculées par section j, prenant en compte les différences d'altitude $[h_i - h_{i+1}]$ entre deux aiguilles distantes de d :

$$L = \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=0}^{n-1} \left(d^2 + [h_i - h_{i+1}]^2 \right)^{1/2} \right]$$

L'indice IR% est compris entre 0 (surface mesurée parfaitement plane) et l'infini, sachant qu'il relate l'augmentation de surface effective due à la rugosité en pour-cent de la surface plane de référence. En clair et par exemple, lorsque IR=2%, la surface de sol estimée sur le plan théorique de 1 m² (parcelle) est de 1.02 m².

Enfin, l'indice IR% est directionnel, il peut être calculé selon la direction des sections m (bâti) ou des aiguilles n. Il prend sa signification en intégrant la rugosité dans le sens de la pente ou d'une opération culturale pouvant induire une rugosité superficielle orientée (labour). C'est ce calcul qui est réalisé pour les données obtenues.

Cette manipulation n'a pu être réalisée sur toute les parcelles, essentiellement en raison de problèmes de positionnement correct des aiguilles (parties aériennes du géranium gênantes -GA-, enfoncement excessif et aléatoire dans l'horizon superficiel pulvérulent -MHAL-).

3.3.4. Conductivité hydraulique

Deux méthodes de mesure de la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) ont été mises en oeuvre sur les parcelles d'essai, afin d'évaluer les potentialités d'infiltration intrinsèques au sol.

La mesure de K_{sat} en laboratoire sur des colonnes de sol prélevées avec des cylindres (HENIN, 1977) s'est avérée imprécise et peu reproductible (GAUDY, 1990). Les résultats obtenus n'ont pas été retenus pour l'analyse. La mesure de K par l'infiltromètre à succion contrôlée (matériel décrit dans la seconde partie -chapitre IV.1.2.-, méthode par SCOTTER et al., 1982) présente l'intérêt de se faire sur le sol en place, non remanié. Deux pressions imposées (succions) ont été appliquées : 0 mm ($K_{sat} = K(0)$) et 30 mm ($K(30)$). En revanche, l'espace nécessaire aux répétitions imposées par cette méthode n'a pas permis de caractériser chaque parcelle élémentaire de 1 m² mais plutôt l'ensemble des couples matériau-itinéraire : KB, GA, MHA, MHAL, MHB et MHBL.

Deux diamètres d'embase sont utilisées r_1 et r_2 , permettant l'obtention de valeurs de flux en régime permanent q_1 et q_2 . Pour des conditions hydriques initiales et de pression imposée ($h=0$ pour K_{sat} , $h=-30$ mm pour $K(30)$) identiques, on peut calculer K .

Les bases théoriques de ce calcul sont exposées plus loin (chapitre III.1.4.)

3.3.4. Mesures concernant la charge solide

Les transports solides peuvent être exprimés sous différentes formes :

- Charge solide Q (g/m²), mesurées directement, elle dépend entre autre de la durée de la pluie,
- Turbidité moyenne du flux ruisselé T (g/l), relative à la quantité d'eau ruisselante, elle traduit la résistance au détachement des surfaces testées (notion de détachabilité),
- Transport solide exprimé par hectare et par unité de surface D (Kg/ha/h), cette valeur est une extrapolation à l'échelle parcellaire des transports mesurés sur le m² élémentaire, elle ne peut en aucun cas rendre compte de l'ensemble des processus érosifs à cette échelle (longueur de pente, formation de rigoles...), encore moins à l'échelle du bassin versant.

3.4. Conditions initiales

3.4.1. Conditions initiales par parcelle

Une série de mesures a été effectuée systématiquement sur chacune des 16 parcelles élémentaires soumises à une averse simulée (données exposées en figure III.36.).

☐ Etat structural superficiel : MWDi et Si

La grande variabilité intra et inter traitements de ces paramètres souligne l'incidence prédominante des types d'horizons culturaux et des itinéraires techniques, par rapport à la nature pédogénétique du substrat, homogène sur l'ensemble de la zone.

La taille moyenne des agrégats superficiels (MWDi) est plus faible sur les parcelles labourées, la variabilité est également nettement atténuée par le travail du sol. Une différence est observée entre horizon : MWDi apparaît plus élevé lorsque l'horizon Aa affleure.

La stabilité des agrégats Si est également variable, en particulier sur le matériau Sa affleurant. Elle y est plus élevée que sur le matériau Aa. On notera que les parcelles MHB et MHL montrent un profil cultural riche en morceaux de tuf, présents en surface sous forme de particules millimétriques à centimétriques, réfractaires à toute destruction par sonification et qui ont augmenté les valeurs de S mesurées.

Le travail du sol a un effet modéré sur Si, il semble en diminuer la valeur et la variabilité.

□ Rugosité IR%

Globalement, la rugosité des placettes est faible et assez homogène. Pourtant, le labour et le semis étant réalisés en courbe de niveau, cette mesure prend en compte la rugosité induite par le passage des outils. L'homogénéisation après semis et le délai entre ces opérations (mars) et la campagne de simulation (septembre) peuvent expliquer l'absence de différences importantes. On notera que les valeurs de IR plus élevées sur le traitement KB, sont occasionnées par le positionnement des aiguilles parfois sur les touffes de kikuyu (talles surélevées) parfois entre ces touffes.

□ Teneur en eau pondérale Wi%

Des échantillons destinés aux mesures gravimétriques ont été prélevés en surface (entre 0 et -5cm) juste avant simulation. Aux dates de réalisation des simulations (début septembre à début octobre, saison sèche), l'humidité du sol est à sa valeur la plus faible.

Les variations de teneur en eau sont faibles entre les parcelles d'un même traitement, plus importante entre les traitements, il est donc possible de définir un état hydrique par type de parcelle.

Les teneurs en eau sont plus élevées dans l'horizon Aa superficiel par rapport à l'horizon Sa affleurant. Les résultats obtenus dans la seconde partie avaient souligné le caractère irréversible et drastique de la dessiccation poussée du matériau andique profond. La réhumectation de ces matériaux séchés ne permet pas le retour aux teneurs en eau originelles, et souvent, elles restent inférieures à celles du matériau superficiel humifère soumis aux mêmes contraintes. Cette différence d'affinité pour l'eau entre matériau andique profond Sa séché et matériau andique humifère superficiel Aa peut être dû aux fortes teneurs en M.O. de ce dernier qui semblent le protéger des réorganisations liées à la dessiccation.

3.4.2. Conditions initiales par traitement

Les conductivités hydrauliques mesurées à saturation (Ksat) et en conditions non saturées (K(-30)) ont été mesurées par infiltrométrie à succion contrôlée, nécessitant de nombreuses répétitions et une extension de la zone de mesure à plusieurs m². Les données obtenues caractérisent donc les différents traitements, sans distinction des parcelles de simulation. Elle doivent permettre de faire la part de l'infiltrabilité intrinsèque du matériau dans l'infiltrabilité globale des parcelles élémentaires qui prend en compte l'état structural de surface, la couverture végétale, la rugosité, l'inclinaison...

Les valeurs de Ksat mesurées sont faibles et homogènes sur l'ensemble des traitements. On note un effet rémanent marqué du labour de premier cycle, en particulier sur l'horizon Aa où la macroporosité générée par le travail du sol augmente l'infiltrabilité (cf chapitre III.1.4.).

Mesurée sur les horizons affleurants, Ksat s'étale entre 60 mm/h (horizons non labourés) et 80 mm/h (horizons labourés). Elle est dans tous les cas supérieure à l'intensité de pluie I des simulations, de

l'ordre de 50 mm/h. En revanche, les valeurs de $K(-30)$ sont inférieures aux intensités incidentes, sauf dans le cas des parcelles labourées MHAL.

Sur l'ensemble de la zone d'expérimentation les valeurs de conductivité hydraulique à saturation des horizons profonds massifs Sa sont de l'ordre de 35 mm/h à 40 mm/h, les valeurs de $K(-30)$ sont de l'ordre de 30 mm/h. Ces valeurs sont très faibles et en accord avec le système poral de tel matériau. La position relative de cet horizon dans les profils peut donc être déterminante sur leur capacité d'infiltration globale.

Un profil moyen type assez constant (voir figure III.33.), un état d'hydratation et une infiltrabilité intrinsèque peuvent caractériser chaque traitement. Ces paramètres ne pourront donc pas expliquer les différences de comportement intra-traitement des différentes parcelles. Les autres conditions initiales sont beaucoup plus variables.

3.5. Hydrodynamique superficielle : les hydrogrammes

3.5.1. Observations préalables

Si le nombre réduit d'observations ne permet pas de procéder à une analyse statistique rigoureuse des résultats, des comportements mis en évidence par l'étude de ces données et appuyés par des observations de terrain peuvent être précisés. L'ensemble des données recueillies lors des simulations sont consignées en figures III.36-37.

8 simulations sur 16 ont occasionné un ruissellement, ce ratio est faible compte tenu des intensités moyennes des averses et des propriétés hydrodynamiques du matériau.

L'absence de flaquage semble typique, aucun débordement de dépressions emplies d'eau n'a été observé, alors que le phénomène est courant sur d'autres matériaux. La nappe ruisselante est difficilement discernable à la surface du sol, elle apparaît extrêmement diffuse et semble circuler dans toute la couche hypodermique, à un état proche de la saturation. Le ruissellement semble généré par un "engorgement" du matériau superficiel sur les parcelles élémentaires.

Lors du creusement de fosses à l'aval immédiat des parcelles en cours de simulation, on observe nettement un écoulement d'eau libre à l'interface Aa ou Sa dégradé / Sa massif, cet écoulement indiquant soit que la saturation est effectivement atteinte dans l'horizon superficiel, soit qu'elle est atteinte uniquement dans la zone interfaciale, à la faveur d'un écoulement gravitaire rapide jusqu'à cette zone par la macroporosité sus-jacente. En toute état de cause, l'infiltrabilité du matériau Sa (liée à son système poral fin, décrit dans la seconde partie) ne permet pas une évacuation verticale rapide de cette eau qui s'écoule latéralement dans le sens de la pente.

On notera que les indices de stabilité initiaux mesurés sur les placettes expérimentales sont plutôt faibles par rapport aux indices mesurés à l'échelle parcellaire dans le chapitre II.2.3.

Figure III.36. Simulations de pluie : paramètres édaphiques initiaux, caractéristiques des averses et paramètres des hydrogrammes.

Traitement	Répétition	ETAT INITIAL i DU SOL					PLUIE		HYDROGRAMME					
		Inclinaison %	MWDi mm	Si	IR %	Wf %	I mm/h	Tu mn	Pi mm	Rx mm/h	Fn mm/h	Kr %	Lr mm	Dr mm
KB	1	14.5	1.55	0.55	5.25	39.2	36	100	>60	0	>36	0	0	0
	2	16.8	0.97	0.63	6.12	27.6	38	100	>63	0	>38	0	0	0
GA	1	23.3	1.33	0.43	-	31.6	47	176	6.68	9.13	37.87	11.36	15.66	0.04
	2	21.7	1.46	0.33	-	38.4	49	190	4.74	12.55	36.45	9.72	15.08	0.05
MHA	1	8	1.71	0.44	1.11	23.5	48	170	8.5	2.16	45.84	2.99	4.07	0.02
	2	8.5	1.48	0.47	1.44	19.8	53	150	>132	0	>53	0	0	0
	3	9.7	1.22	0.34	0.72	20.2	50	82	3.3	14.47	35.53	27.61	18.87	0.14
MHAL	1	11.2	1.39	0.37	-	26.3	49	187	14.11	3.33	46.1	2.02	3.08	0.05
	2	13	1.23	0.43	-	21.3	48	151	5.29	14.07	33.89	15.54	18.77	0.15
	3	8.2	1.41	0.33	-	23.9	51	120	>102	0	>51	0	0	0
MHB	1	24.7	0.97	0.41	1.56	18.8	40	93	4.35	3.17	36.97	8	4.94	0.04
	2	19.3	1.57	0.65	1.68	17.2	42	85	>60	0	>42	0	0	0
	3	14.2	1.35	0.79	1.32	15.5	43	60	>43	0	>43	0	0	0
MHL	1	15	1.16	0.38	1.45	18	49	182	2.84	9.66	39	10.95	16.27	0.06
	2	22.8	1.03	0.69	1.5	16	45	100	>75	0	>45	0	0	0
	3	22.3	1.18	0.64	1.81	15.2	52	75	>65	0	>52	0	0	0

Figure III.37. Simulations de pluie : paramètres de structure superficielle, paramètres des hydrogrammes et transports solides sur les parcelles ayant ruisselé.

		ETAT INITIAL i DU SOL			HYDROGRAMME			TRANSPORTS SOLIDES				
Traitement	Répétition	MWDi mm	Si	IR %	Rx mm/h	Fn mm/h	Kr %	Lr mm	Q g/m2	T g/l	D Kg/ha/h	MWDc mm
GA	1	1.33	0.43	-	9.13	37.87	11.36	15.66	67.6	4.3	244	0.88
	2	1.46	0.33	-	12.55	36.45	9.72	15.08	40.9	2.7	129	1.59
MHA	1	1.71	0.44	1.11	2.16	45.84	2.99	4.07	19.2	4.7	68	2.07
	3	1.22	0.34	0.72	14.47	35.53	27.61	18.87	27.9	1.5	204	0.73
MHAL	1	1.39	0.37	-	3.33	46.1	2.02	3.08	2.5	0.8	8	1.05
	2	1.23	0.43	-	14.07	33.89	15.54	18.77	78.5	4.2	311	0.93
MHB	1	0.97	0.41	1.56	3.17	36.97	8	4.94	5.7	1.1	37	0.98
MHBL	1	1.16	0.38	1.45	9.66	39	10.95	16.27	20.6	1.3	68	1.16

3.5.2. Paramètres hydrodynamiques : déterminismes et variabilités

□ Analyse des données

Pour l'ensemble des paramètres des hydrogrammes, qui constituent les variables à expliquer, on a cherché à mettre en évidence l'implication des paramètres d'état initial. L'établissement de régressions linéaires sur les différents couples "facteur initial / paramètre hydrodynamique" possibles a été tenté malgré le faible nombre d'échantillons (GAUDY, 1990). Les résultats obtenus sont décevants et ne permettent pas d'établir de relations causales évidentes. L'étude des données obtenues permet cependant de souligner certaines tendances :

Le ruissellement maximum est variable mais reste faible : 0 à 14.5 mm/h pour des averses de 45 à 50 mm/h. L'infiltrabilité minimale est élevée même sur les parcelles ayant ruisselé où elle s'étend de 34 à 46 mm/h. Elle suit par définition les intensités de pluie sur les autres (jusqu'à 52 mm/h). Ces valeurs de F_n sont comprises entre les valeurs de K_{sat} et de $K(-30)$, sauf dans le cas des deux parcelles labourées MHAL. Dans tous les cas, F_n reste un peu supérieure à la conductivité hydraulique à saturation du matériau sous jacent S_a . Sur les mêmes parcelles agricoles, des aspersion d'intensité plus fortes ($I=60$ à 80 mm/h) ont occasionnées des ruissellements forts (20 à 40 mm/h) mais des infiltrations minimales F_n très proches de nos résultats (ADAM DE VILLIERS, 1990 ; GOUBAND, 1992).

Le coefficient K_r est un indicateur de l'efficience érosive de l'averse, il est variable et plutôt faible (0 à 27%) ; on notera qu'il est très homogène et proche de 10% sur les sols dégradés, beaucoup plus variable sur l'horizon Aa où il prend les valeurs les plus fortes lorsque les agrégats initiaux sont plus petits. Sur des sols très sensibles à l'érosion, K_r est généralement supérieur à 50% (ROOSE, 1981).

On notera qu'en cas de ruissellement, les paliers ne sont atteints qu'après des averses longues (50 à 175 min.), il apparaît nettement que les paliers sont atteints plus rapidement lorsque l'horizon S_a est proche de la surface (10 - 15 cm).

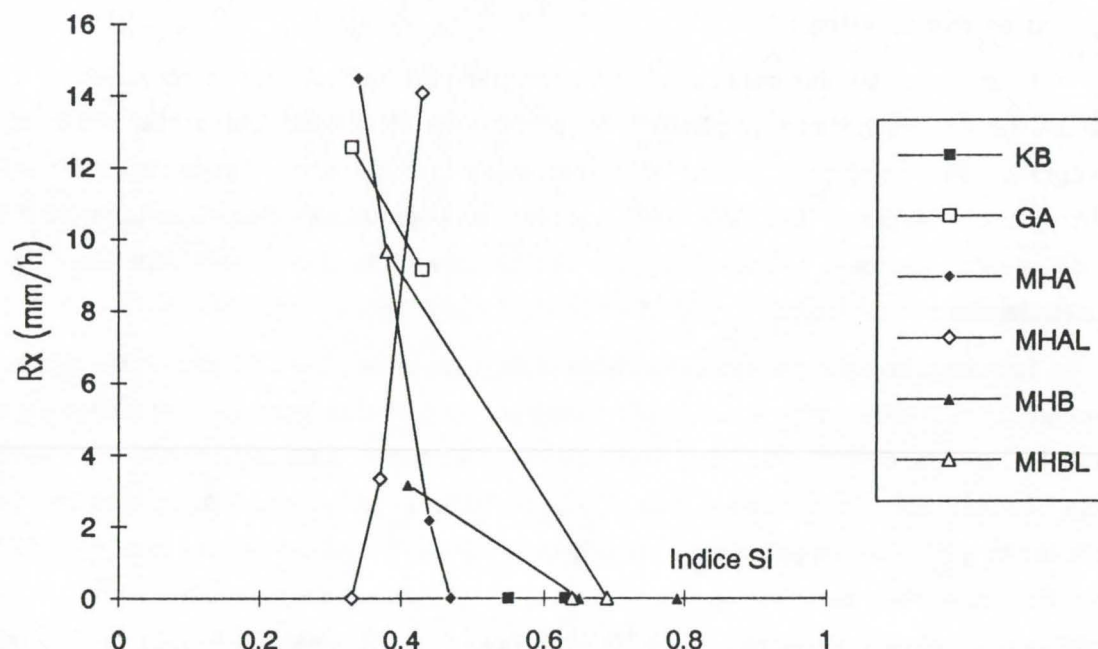
Au plan du déterminisme des facteurs initiaux sur l'hydrodynamique superficielle, aucune tendance nette ne peut être dégagée, compte tenu du faible nombre de répétitions, des inter-relations entre variables (interactions, phénomènes de seuils, hiérarchie, facteurs limitants...).

Il apparaît cependant que sur les parcelles ayant ruisselé, l'indice de stabilité initial S_i était très faible (entre 0.44 et 0.33). A l'intérieur d'un même traitement, le ruissellement a eu lieu sur les parcelles où les valeurs de S_i étaient les plus faibles, c'est particulièrement nette sur sol érodé ou dégradé MHB, MHBL et GA (figure III.34.). En revanche, cet effet n'apparaît pas sur les parcelles MHAL (horizon Aa labouré).

On remarque que les pentes pourtant très variables (8 à 25%) ne semblent déterminantes que sur sol non érodé MHA et MHAL.

Au plan des types d'itinéraires, il faut noter l'absence de ruissellement sur les parcelles couvertes de kikuyu KB, et le ruissellement relativement important relevé sur les parcelles plantées de géranium sur sol dégradé GA. A l'échelle des parcelles élémentaires, l'effet du labour n'apparaît pas déterminant.

Figure III.38. Ruissellement Rx représenté en fonction de l'indice de stabilité initial Si sur les parcelles élémentaires soumises à des averses simulées



□ Hypothèses

L'analyse des données associée aux observations de terrain entraînent certaines remarques et hypothèses :

- sous des intensités d'averses de l'ordre de celles des simulations, l'infiltration est proche des capacités intrinsèques de l'horizon affleurant (définies par K_{sat} et $K(-30)$), parallèlement on note que parmi les paramètres caractérisant les états initiaux sur les différentes parcelles, seule la stabilité des agrégats semble jouer un rôle sur les paramètres hydrodynamiques mesurés (les forts ruissellements sont liés à des stabilités faibles) ;

- la faible infiltrabilité du matériau Sa sous-jacent n'apparaît pas directement déterminante dans le cadre des simulations. La présence à faible profondeur de cet horizon accélère cependant l'obtention d'un palier de ruissellement. Les observations de profil après simulation montrent que le front d'infiltration a atteint dans tous les cas cet horizon (présent entre -5 et -40 cm), l'eau d'infiltration de charge positive pourrait rapidement atteindre l'interface horizon cultural - Sa à la faveur de l'agrégation et de la porosité grossières puis suivre 3 processus concomitants :

- * un écoulement latéral dans les sens de la pente à cet interface (en fonction de sa profondeur, cette eau "de ruissellement profond" échappe à toute mesure),
- * un écoulement vertical lent dans le matériau Sa micro-poreux,
- * une imprégnation remontante capillaire verticale de l'horizon cultural, qui aboutit, lorsque celui-ci est effectivement saturé, au ruissellement superficiel mesurable (le palier de ruissellement est plus rapidement atteint lorsque l'horizon Sa massif est proche de la surface).

Ces hypothèses concernent un comportement global des horizons culturels d'andosols. Les données fragmentaires obtenues laissent supposer que les mécanismes superficiels favorisant le ruissellement diffèrent un peu selon le type de matériau affleurant : la relation entre stabilité des agrégats et ruissellement, nette dans le cas de sols érodés, indique la possibilité de réorganisations structurales superficielles sous pluie, rapides puisque le palier de ruissellement est atteint plus rapidement sur ces sols dégradés que sur sols structurés. L'hypothèse de battance sera développée plus loin. Auparavant et pour clore l'analyse des résultats obtenus directement par simulation de pluie, la charge solide des eaux de ruissellement est étudiée.

3.6. Les transports solides

Trois paramètres expriment l'exportation de sol au cours du ruissellement : la charge solide totale Q (g/m^2), la turbidité moyenne du flux ruisselé T (g/l), le transport solide total exprimé par hectare et par heure D (kg/ha/h). Une granulométrie d'agrégat a été réalisée sur les sédiments exportés à chaque simulation (MWDc). Le tableau III.37. expose les données obtenues au cours des simulations ayant occasionné un ruissellement.

Les valeurs de T et de D ne sont pas très élevées, mais non négligeables si l'on considère qu'elles traduisent les quantités de matériau exportées uniquement par la nappe diffuse d'eau ruisselante, de faible compétence à l'échelle du m^2 , et qu'elles ne peuvent rendre compte de phénomènes plus abrasifs à l'échelle pluri-parcellaire d'un système de culture (rigoles, accumulations...).

Compte tenu du faible nombre d'observations disponibles, seule une analyse globale et inter-traitements est possible. La répartition des ruissellements sur les différents traitements permet cependant de différencier les parcelles expérimentales selon le type de matériau affleurant : sol érodé / dégradé pour GA, MHB et MHL (Sa particulière sec ou LAa dégradé) ; horizon Aa humifère structuré affleurant pour MHA et MHAL. L'analyse comporte deux volets : effets des conditions initiales et effets du ruissellement sur les transports solides.

3.6.1. Effets des conditions initiales

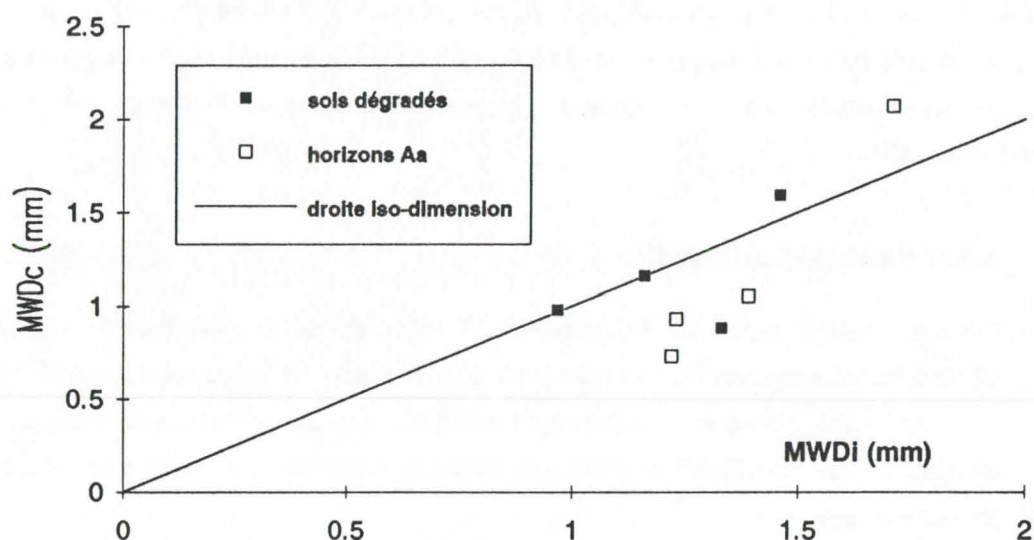
□ Sur la nature dimensionnelle de la charge solide

On note d'emblée que, dans le cadre de ces simulations, ni la pente des parcelles, ni la teneur en eau superficielle n'influencent les caractéristiques du transport solide.

En revanche, l'état structural initial, quantifié par MWDi et Si, semblent déterminer les caractéristiques dimensionnelles des sédiments exportés.

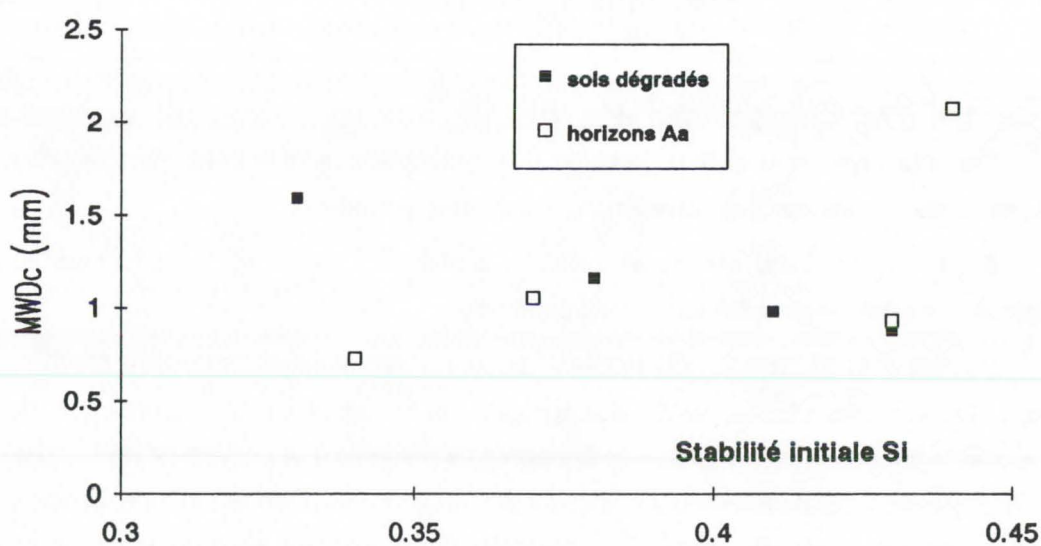
La figure III.39. représente la taille moyenne des agrégats exportés MWDc exprimée en fonction de la taille moyenne initiale MWDi des agrégats sur les parcelles. On observe que globalement les agrégats exportés sont de la même taille que les agrégats présents à la surface des parcelles. Dans le cas de sols non dégradés, pour de faibles dimensions initiales ($< 1.5 \text{ mm}$), les agrégats exportés sont plutôt de taille inférieure, pour des agrégats initiaux plus grossiers ($> 1.5 \text{ mm}$), les agrégats exportés sont plutôt plus gros. Ce résultat est en accord avec BOUGERE (1988) et QUANTIN (1990) qui observent que les phénomènes érosifs pluviaux sur andosols recrutent directement les agrégats superficiels quasiment sans déstructuration, par des processus de transports par flottement.

Figure III.39. Taille moyenne des agrégats exportés MWDc exprimée en fonction de la taille moyenne initiale des agrégats sur les parcelles.



La figure III.40. représente la taille moyenne des agrégats exportés MWDc exprimée en fonction de la stabilité initiale Si des agrégats sur les parcelles. Dans le cas des sols non dégradés, il apparaît une relation positive entre stabilité initiale et taille des agrégats exportés, mettant en évidence une déstructuration possible avant transport des agrégats les moins stables. Sur sols dégradés, la relation apparaît nettement négative.

Figure III.40. Taille moyenne des agrégats exportés MWDc exprimée en fonction de la stabilité initiale des agrégats sur les parcelles.



□ Sur quantité de matériau exporté

Seules des relations entre l'état structural initial des parcelles (MWDi et Si) et la turbidité du flux ruisselé (T en g/l) peuvent être établies (figures III.41-42.) : à des agrégats initiaux grossiers et stables correspondent des turbidités plus importantes. Lorsque le ruissellement se déclenche, ces agrégats doivent donc contribuer à alimenter la charge solide exportée. On n'observe cependant pas de relation nette entre turbidité et taille moyenne des agrégats effectivement transportés (MWDc). Un double processus peut être en jeu : un transport d'agrégats disloqués et intacts ; et un transport d'agrégats plus fins issus de l'abrasion / éclatement des précédents par effet splash et battance.

Figure III.41. Turbidité moyenne du flux ruisselé exprimé en fonction de la taille moyenne initiale des agrégats sur les parcelles

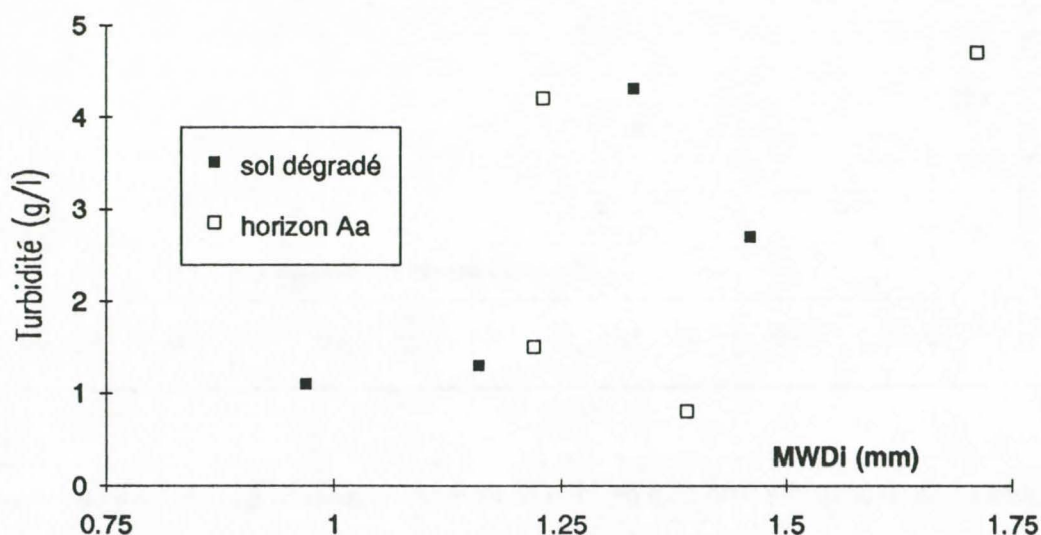
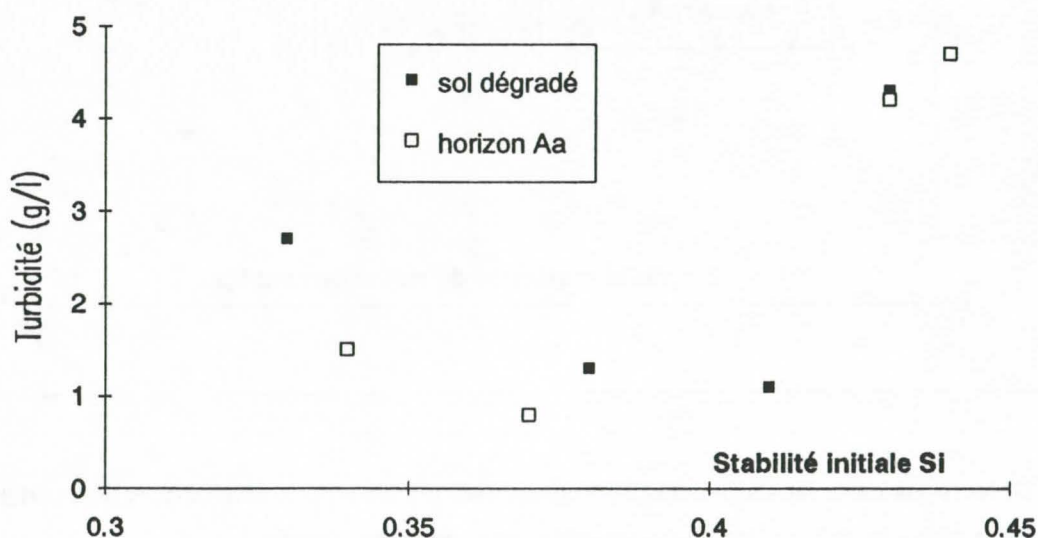


Figure III.42. Turbidité moyenne du flux ruisselé exprimé en fonction de la stabilité initiale des agrégats sur les parcelles



3.6.2. Relations ruissellement / turbidité

Les caractéristiques quantitatives de la charge solide (D, T, Q) sont liées aux paramètres de l'hydrogramme : des ruissellements intenses ont générés des exportations de sol importantes (figures III.43-44.). En revanche, aucune liaison ne peut être établie entre ruissellement et dimension des produits exportés.

Figure III.43. Transport solide total exprimé en Kg/ha/h en fonction du coefficient de ruissellement Kr%.

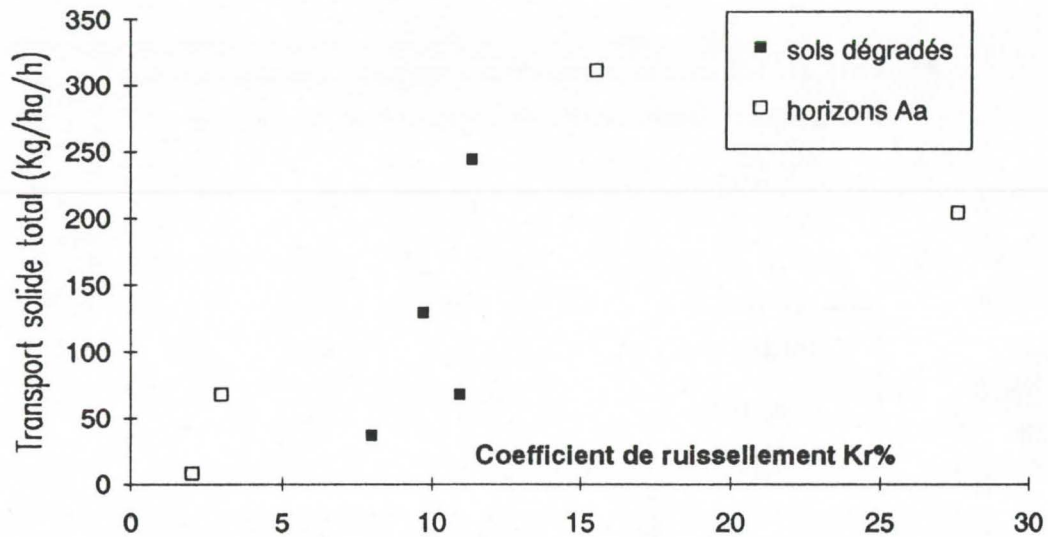
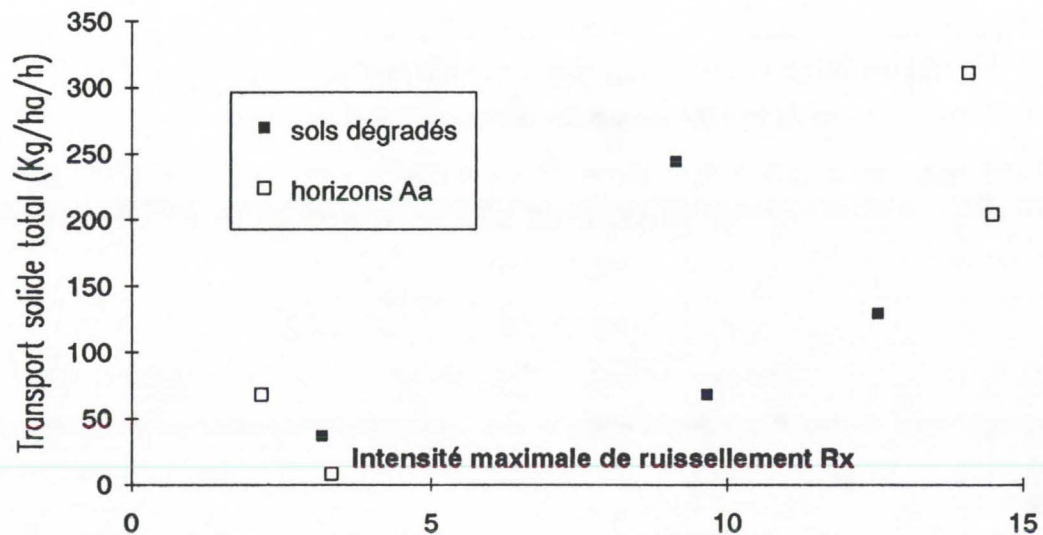


Figure III.44. Transport solide total exprimé en Kg/ha/h en fonction de l'intensité maximale de ruissellement Rx (mm/h).



Comme les caractéristiques des hydrogrammes, les transports solides sont très variables dans leur nature et leur quantité, même si la charge solide exportée reste modérée.

La synthèse des résultats, même s'ils sont obtenus sur un faible nombre de manipulations, laisse supposer que la battance n'est pas le processus primordial intervenant dans l'érosion pluviale des andosols.

3.7. Evolution de l'état structural de surface et mécanismes du ruissellement

Une analyse plus fine de l'évolution dimensionnelle des agrégats et de la rugosité après simulation, ainsi que de la nature de la charge solide transportée doit permettre de préciser les inter-relations entre ruissellement et structures superficielles.

3.7.1. Indices et variations calculés

Des échantillons sont prélevés sur les placettes avant (indice i) et après (indice f) simulation pour la mesure de MWD et S, des mesures de IR% sont réalisées dans les mêmes conditions. Pour caractériser l'évolution de ces paramètres, des indices sont calculés à partir des classes granulométriques obtenues par tamisage :

* un indice R_{if} relatant la tendance d'évolution d'une classe granulométrique C(i) donnée, entre le sol à l'état initial C(i)_i et le sol après simulation C(i)_f ; tel que : $R_{if}(i) = C(i)_f\% / C(i)_i\%$,

* un indice R_{ic} relatant la tendance d'évolution d'une classe granulométrique C(i) donnée, entre le sol à l'état initial C(i)_i et la charge solide exportée par ruissellement C(i)_c ; tel que : $R_{ic}(i) = C(i)_c\% / C(i)_i\%$,

* les variations de MWD, S et IR%, exprimées en pourcentage de la valeur à l'état initial ; telles que :

$$d(MWD) = \%(MWD_f - MWD_i) / MWD_i$$

$$d(S) = \%(S_f - S_i) / S_i$$

$$d(IR) = \%(IR_f - IR_i) / IR_i.$$

NB : R_{if} et d(MWD) ont été calculés pour toutes les parcelles (16).

R_{ic} et d(S) ont été calculés pour les parcelles ayant ruisselé (8)

3.7.2. Evolutions granulométriques en surface et dans la charge solide

□ Tendances globales

On étudie la répartition des différentes classes d'agrégats avant et après simulation de pluie pour l'ensemble des parcelles. L'ensemble des indices R_{if} établis par classe est relaté dans le tableau III.45. Les indices R_{ic} fournissent des indications concernant la sensibilité à l'entraînement par ruissellement des différentes classes présentes initialement (figure III.46.).

Globalement, les classes d'agrégats superficiels fins (< 0.05 mm) et grossiers (2 - 5 mm) sont renforcées après averse, au détriment des classes intermédiaires (0.05 à 0.5 mm). Deux exemples de répartition des classes dimensionnelles pondérales d'agrégats avant et après simulation sont fournis en figures III.47-48.

Figure III.45.

Evolution des différentes classes d'agrégats sous pluies simulées

Indices RIF par classe d'agrégats

$RIF(i) = (\% \text{ de la classe } i \text{ après simulation}) / (\% \text{ de la classe } i \text{ avant simulation})$

(en gras : valeurs supérieures à 1.2 ; en italique : valeurs inférieures à 0.8)

Parcelles	Classes d'agrégats (en mm) :					
	< 0.05	0.05-0.2	0.2-0.5	0.5-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
KB1	2.84	1.41	1.14	0.95	0.93	<i>0.55</i>
KB2	1.25	1	0.86	0.94	0.96	1.1
GA1	1.17	<i>0.77</i>	0.86	1	1.27	1.2
GA2	1.75	0.85	<i>0.66</i>	<i>0.7</i>	0.95	1.26
MHA1	1.1	1.01	0.92	0.99	1.1	0.96
MHA2	1.05	0.92	0.91	1.06	1.3	0.86
MHA3	1.39	<i>0.64</i>	<i>0.77</i>	1	1.35	1.15
MHAL1	1.25	<i>0.45</i>	<i>0.58</i>	0.84	1.14	1.49
MHAL2	1.03	<i>0.68</i>	<i>0.76</i>	1.02	1.45	1.33
MHAL3	0.83	<i>0.77</i>	<i>0.78</i>	0.97	1.13	1.23
MHB1	1.23	<i>0.5</i>	<i>0.54</i>	0.93	1.75	1.85
MHB2	1.37	<i>0.76</i>	<i>0.73</i>	0.98	1.14	1.06
MHB3	1.89	<i>0.47</i>	<i>0.57</i>	0.81	0.89	3.87
MHBL1	1.88	<i>0.75</i>	<i>0.56</i>	<i>0.73</i>	1.18	1.59
MHBL2	1.33	<i>0.6</i>	<i>0.61</i>	0.95	1.4	1.66
MHBL3	1.33	0.82	<i>0.71</i>	0.92	1.3	1.18

Tableau III.46. :

Sensibilité à l'entraînement par ruissellement des différentes classes d'agrégats.

Indices RIC par classe d'agrégats

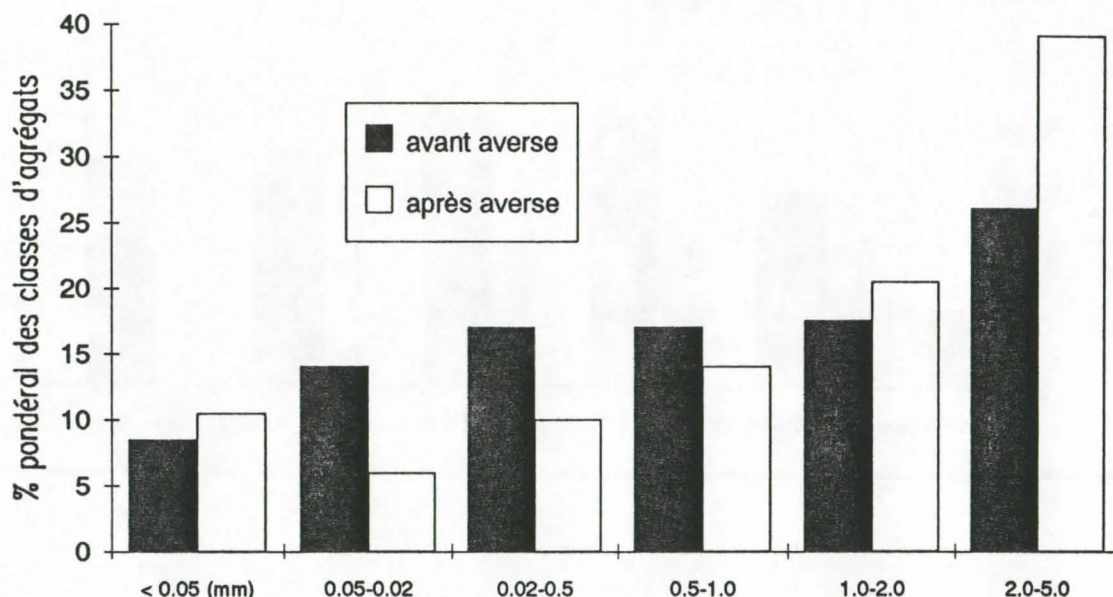
$RIC(i) = (\% \text{ de la classe } i \text{ dans la charge solide}) / (\% \text{ de la classe } i \text{ avant simulation})$

(en gras : valeurs supérieures à 1.2 ; en italique : valeurs inférieures à 0.8)

Parcelles	Classes d'agrégats (en mm) :					
	< 0.05	0.05-0.2	0.2-0.5	0.5-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
GA1	0.95	1.27	1.39	1.19	1.16	<i>0.45</i>
GA2	1.29	0.95	0.84	0.83	0.9	1.2
MHA1	1.38	<i>0.59</i>	<i>0.65</i>	<i>0.77</i>	0.85	1.37
MHA3	3.65	0.84	0.98	0.93	0.9	<i>0.41</i>
MHAL1	4.03	1.59	<i>0.52</i>	<i>0.21</i>	<i>0.4</i>	0.93
MHAL2	0.85	<i>0.7</i>	1.01	1.38	1.56	<i>0.63</i>
MHB1	2.47	<i>0.52</i>	<i>0.73</i>	0.89	1.5	0.9
MHBL1	1.96	<i>0.76</i>	<i>0.68</i>	<i>0.79</i>	1.16	1.37

Pour les deux indices, on remarque des comportements différents entre horizons dégradés (MHB, MHBL, GA) et horizons Aa affleurants (MHA, MHAL).

Figure III.47. Répartition pondérale des différentes classes d'agrégats sur la parcelle MHAL1, avant et après averse.



☐ Horizons dégradés

Les comportements granulométriques superficiels mesurés sur les traitements MHB et MHBL sont très homogènes. Lorsque l'horizon Sa affleure et qu'il soit remanié ou non, avec ou sans ruissellement, on observe sous pluie simulée :

- * une augmentation homogène du pourcentage d'agrégats très fins (< 0.05 mm) de 20 à 90%,
- * une augmentation plus variable du pourcentage d'agrégats grossiers (> 1 mm),
- * une diminution du pourcentage d'agrégats intermédiaires,
- * une augmentation nette de la taille moyenne des agrégats MWD (figure III.49.).

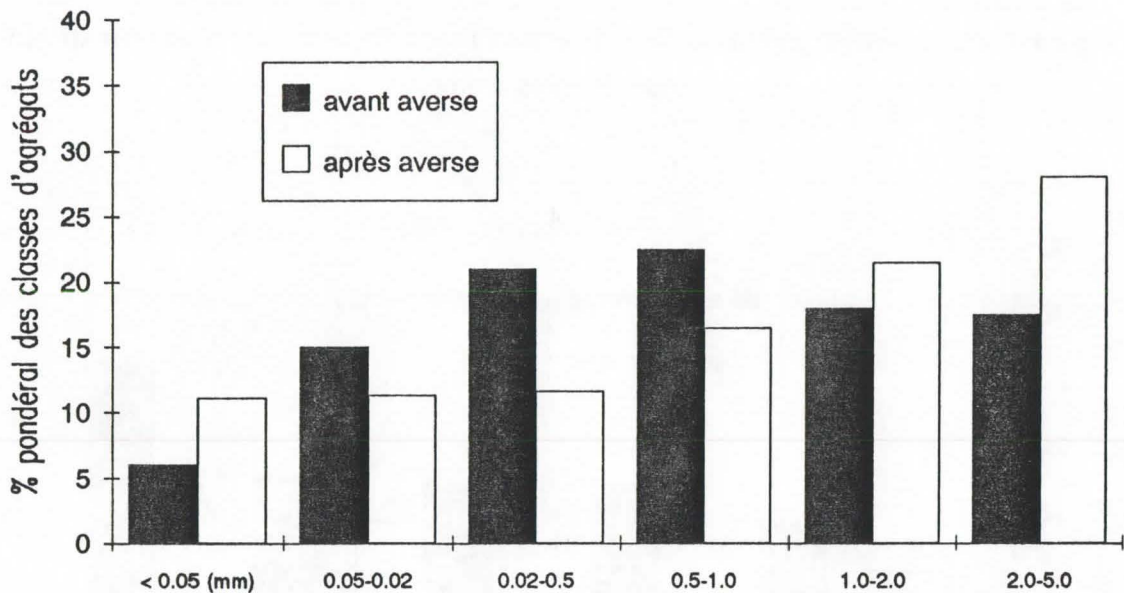
L'analyse des distributions d'agrégats de la charge solide montre un entraînement plus important des fractions les plus fines (< 0.05 mm) et les plus grossières (> 1 mm).

Sur ces matériaux, 3 processus pourraient être en cause :

- * rupture des agrégats de tailles intermédiaires les moins stables (battance) et enrichissement de la fraction la plus fine,
- * transport modéré de la fraction la plus fine,
- * enrichissement relatif des fractions grossières, modérément transportée.

Sur le traitement GA (horizon Aa dégradé, géranium), les deux parcelles étudiées ont des comportements opposés : si GA2 suit le modèle proposé plus haut (de façon modérée), sur GA1, les agrégats intermédiaires sont préférentiellement transportés, l'effet de battance y est inexistant.

Figure III.48. Répartition pondérale des différentes classes d'agrégats sur la parcelle MHBL1, avant et après averse.



□ Horizons Aa

Les comportements sont très variables. On note que l'évolution granulométrique superficielle y est moins intense que sur sols dégradés, que les classes dimensionnelles intermédiaires semblent plus sensibles à l'entraînement par ruissellement après travail du sol.

Dans l'ensemble, il apparaît que si la battance existe, elle reste modérée et variable. Elle touche principalement les agrégats de taille inférieure à 1 mm et ne concerne pas la fraction grossière. Celle-ci est en revanche transportée sans fractionnement par les eaux de ruissellement.

3.7.3. Evolutions globales de la structure superficielle et du micro-relief

□ Variations globales d(MWD), d(S) et d(IR)

La figure III.49. fournit les résultats de d(MWD), d(S) et d(IR) sur l'ensemble des parcelles.

Concernant l'ensemble des parcelles, on observe que le diamètre moyen des agrégats superficiels a globalement augmenté sous l'effet des pluies incidentes, la rugosité a plutôt diminué.

Concernant les parcelles ayant ruisselé, on distingue deux comportements différents entre horizons Aa et horizons dégradés, les tendances suivantes sont dégagées :

- * sur les sols non-érodés, le micro-relief reste stable, la stabilité des agrégats diminue,
- * sur les sols dégradés, le micro-relief est atténué, la stabilité structurale augmente fortement.

Ces derniers seraient donc plus sensibles à la battance, puisque les ruissellements n'y ont pas été plus intenses. Par ailleurs, il a été montré que le ruissellement n'apparaissait sur ces sols que lorsque la

stabilité des agrégats était faible (chap. II.3.5., figure III.38.). Les phénomènes de battance induits par des averses modérées (50mm/h pendant 93 à 190 min.) semble rester cependant en second plan dans l'initiation du ruissellement puisque la "fonte" des agrégats initiaux n'apparaît en aucun cas clairement ($d(MWD)$ est largement positif), le contenu de la charge solide est de dimension importante (MWD_c).

Figure III.49. Evolution de l'état structural (quantifié par MWD et S) sous pluie simulée
 $d(MWD)\% = \%(MWD_f - MWD_i)/MWD_i$ $d(S)\% = \%(S_f - S_i)/S_i$ $d(IR)\% = \%(IR_f - IR_i)/IR_i$.

Parcelles :	$d(MWD)\%$	$d(S)\%$	$d(IR)\%$
KB1	-32.9	-	-36.2
KB2	3.1	-	- 9.1
GA1	5.3	13.9	-
GA2	12.3	9.1	-
MHA1	- 1.2	-38.6	0
MHA2-	4.1	-	- 4.2
MHA3	13.9	-14.7	- 1.4
MHAL1	30.9	-27	-
MHAL2	20.3	16.3	-
MHAL3	16.3	-	-
MHB1	54.6	56.1	- 8.3
MHB2	5.8	-	- 9.5
MHB3	26.7	-	-23.2
MHBL1	29.3	42.1	- 9.0
MHBL2	38.8	-	- 8.6
MHBL3	15.6	-	3.9

□ Incidences sur le ruissellement : modélisation et hypothèses concernant la battance

Si l'on exprime le ruissellement maximal mesuré R_x en fonction de l'intensité de pluie simulée dans le cadre de nos manipulations et dans le cadre d'autres campagnes (ADAM de VILLIERS, 1990 ; GOUBAND, 1992) effectuée à des intensités supérieures mais en conditions plus érosives *a priori* (pente des parcelles = 12.5 à 20% ; sols dégradés sarclés nus ou sous géranium peu couvrant) et sur des parcelles agronomiques très proches, on constate que le ruissellement maximal mesuré R_x semble borné proportionnellement à l'intensité incidente I , pour une gamme de I s'étalant de 36 à 83 mm/h (figure III.50.).

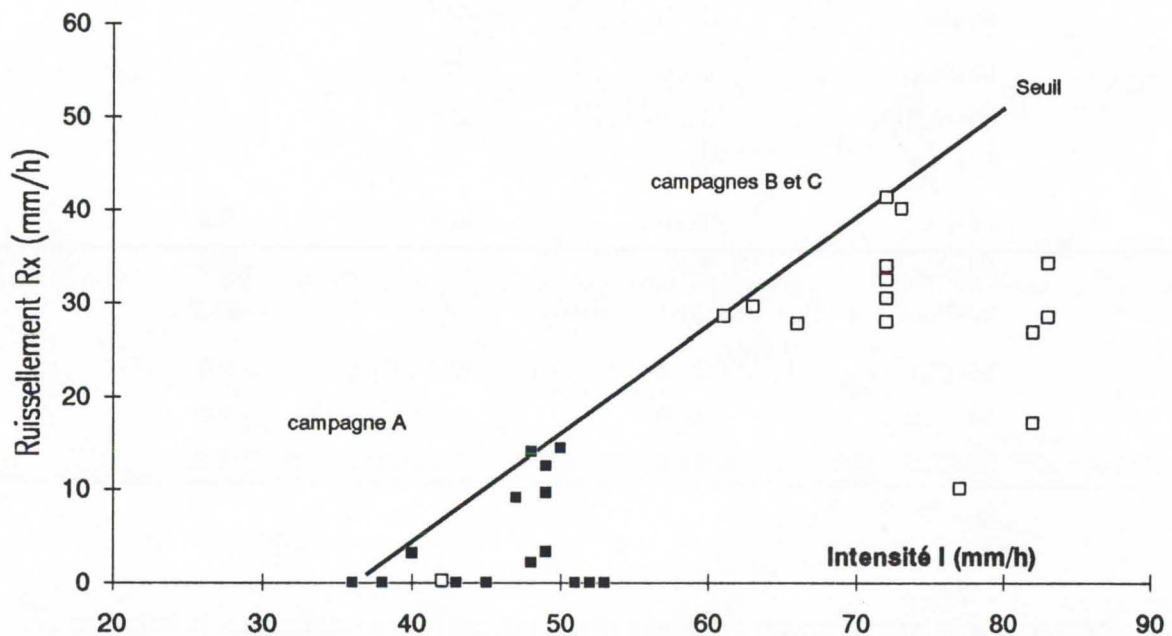
Cette première valeur constitue un seuil expérimental pour le ruissellement. Les valeurs de R_x obtenues en-dessous de la droite seuil reflètent des conditions superficielles limitantes pour le ruissellement (taux de couverture, structure, rugosité...). Les valeurs situées à proximité de cette droite expriment des conditions superficielles d'érodibilité optimales : sol non couvert, de faible rugosité, à structures instables et de faible dimension.

A partir des données obtenues, on peut ainsi modéliser le ruissellement potentiel maximum en fonction de l'intensité de pluie incidente, ceci en précisant que :

- le modèle est valide pour des pentes de parcelles élémentaires jusqu'à 20% et pour des sols sans couvert végétal ;
- il s'applique au matériau andique non perhydraté de la zone d'étude à 1 000 m dans les hauts de l'ouest ;
- il concerne essentiellement le ruissellement diffus, directement généré par les interactions pluie incidente-état de surface-perméabilité intrinsèque du sol ;
- il ne prend pas en compte les effets cumulatifs de ruissellement concentré intra et inter-parcelles ;
- il ne préjuge pas de la turbidité de ce ruissellement, directement en cause dans les processus érosifs, et dépendant des caractéristiques de surface (structure, rugosité, couverture végétale ...).

Figure III.50. Intensité de ruissellement Rx (mm/h) exprimée en fonction de l'intensité de pluie simulée I (mm/h)

Résultats obtenus lors de nos essais (campagne A), par ADAM DE VILLIERS (1990) (campagne B) par GOUBAND (1992) (campagne C).



A partir des points de plus fort ruissellement dans la gamme des différentes intensités, on peut caler une droite-seuil d'équation :

$$Rx = 1.16 \cdot I - 42$$

La pente de cette droite n'est pas égale à 1, l'infiltration minimale $F_n (= I - Rx)$ n'est donc pas une constante, elle tend à diminuer légèrement lorsque l'intensité augmente. F_n , de l'ordre de 36 puis de 30 mm/h, et reste inférieure à la conductivité hydraulique mesurée en surface, mais très proche de celle du matériau Sa massif.

L'infiltration minimale pourrait donc être principalement tributaire de la faible perméabilité du matériau Sa et d'un effet de battance discret sous intensités modérées, plus marqué sous fortes intensités.

En toute état de cause et pour la gamme d'intensité criblée, on n'observe pas un emballement du ruissellement qui pourrait trahir un effet prépondérant de la battance sous fortes intensités (colmatage de la porosité superficielle, micro-tassements, organisations pelliculaires superficielles...), même si dans le cas des sols dégradés, l'aplanissement du micro-relief, l'augmentation de la stabilité des agrégats superficiels et la relation $R_x - I$ modélisée traduisent l'existence discrète de ce processus. Ce phénomène reste très marginal lorsque l'horizon Aa s'est maintenu : forte résistance des agrégats, les plus stables étant exportés presque en l'état.

Concernant l'effet d'un couvert végétal, il ne réduit pas significativement le ruissellement, mais annule sa turbidité sur couverture vive récemment installée (GOUBAND, 1992). Les effets à long terme restent à étudier.

4. Synthèse et conclusions

4.1. *L'état structural des horizons superficiels : déterminismes*

La dualité structurale pédogénétique entre horizon superficiel humifère originel Aa et horizon sous-jacent Sa est marquée. Elle se traduit par une agrégation grossière et stable pour Aa, par l'absence de structure pour Sa. Cette dualité semble liée au "degré d'andacité" du matériau (teneur en minéraux cristallisés à courte distance : allophanes s-l, oxydes-hydroxydes...) et aux fortes teneurs superficielles en matière organique puisqu'elle est plus marquée dans les andosols que dans les sols andiques de moindre altitude.

Conformément aux résultats obtenus dans la seconde partie, la dessiccation drastique du matériau induit une réorganisation importante des structures, en particulier dans les horizons Sa. Les facteurs bioclimatiques prennent certainement une part essentielle dans les processus de structuration (augmentation de la taille et de la stabilité des agrégats). De fait, au champ, quel que soit le type d'horizon affleurant, la couche superficielle présente toujours une structure plus marquée, structure plus ou moins stable, et de faciès variés dans le cas des sols érodés et dégradés. D'autres processus sont évidemment en jeu dans la différenciation structurale des horizons, dans la succession Sa-Aa : d'ordre biologique (apports de M.O., action de la méso-faune, de la micro-flore, des racines), d'ordre mécanique (histoire culturale, sollicitations par les engins -tassements, fragmentations, mélanges-).

On souligne la difficulté à qualifier le matériau superficiel particulier généré par les processus anthropiques et érosifs : le matériau Sa desséché, particulière et stable, de fonctionnements très différent de l'horizon Sa sous jacent (structures, système poral), de l'horizon Aa initial (teneurs en M.O., activité biologique, structures, système poral). De plus, à l'échelle de parcelles agricoles, l'horizon cultural est constitué d'un mélange de ce matériau Sa dégradé particulière, de mottes de Sa massif remonté par les outils, de reliques d'horizon Aa, l'ensemble résultant d'une histoire culturale et énergétique.

Les observations faites à l'échelle parcellaire confirment la nature essentiellement pédogénétique du déterminisme de la structure. Au plan de l'anthropisation des sols, on observe cependant nettement que :

- les données caractérisant la structure sont peu variables à l'échelle parcellaire, lorsque l'horizon Aa s'est maintenu, le travail du sol les homogénéise ; lorsque l'horizon Sa affleure, la variabilité s'accroît ;
- la mise en culture, et particulièrement la préparation mécanisée des sols, modifie la nature des agrégats : leur taille est réduite (surtout pour Aa), leur stabilité aurait tendance à augmenter pour Aa, à diminuer pour Sa ;
- la taille des agrégats est la variable la plus sensible au travail du sol, leur stabilité l'est dans une moindre mesure et semble davantage gouvernée par un déterminisme édaphique ;
- aux agrégats les plus grossiers et les plus stables sont associées des teneurs en carbone organique total plus élevées, c'est particulièrement net dans les horizons dégradés Sa affleurant.

Les données et observations recueillies soulignent l'originalité de la structure dans les andosols. D'après HENIN (cité par CHAMAYOU et LEGROS, 1989), les structures fragmentaires sont les plus fréquentes dans les sols. Les agrégats, de forme variées, sont constitués de structures élémentaires soudées par l'argile et l'humus. Dans l'horizon superficiel Aa sous friche, les agrégats sont de type grumeleux, très humifères et déterminés par une activité faunique intense. Dans l'horizon Sa massif sous jacent, la structure est continue.

La mise en culture de ces sols modifie la structure, par fragmentation des agrégats de l'horizon superficiel initial, par mobilisation et dessiccation de l'horizon profond.

Dans les andosols cultivés, la structure superficielle est de type particulière, recouvrant une structure continue.

4.2. Etat structural et hydrodynamique superficielle

Sous des pluies de l'ordre de 50 mm/h, les andosols étudiés présentent une faible aptitude au ruissellement. Celui-ci est variable mais les pluies restent peu efficaces (coefficient $K_r < 30\%$). GOUBAND (1992) montre cependant que sous fortes intensités et sur sols très dégradés, K_r peut atteindre 40%.

Deux éléments principaux ont pu être mis en évidence :

- l'initiation du ruissellement n'est pas liée au débordement de flaques ni au colmatage de la porosité superficielle par battance, mais à une saturation progressive de l'horizon macroporeux superficiel, saturation gouvernée par l'infiltrabilité de l'horizon Sa immédiatement sous-jacent ;
- le ruissellement, de faible compétence à l'échelle du m^2 , entraîne une charge solide de dimension nettement bimodale : des particules fines et des agrégats de taille importante ($> 1\text{ mm}$) non déstructurés. Le transport de tels éléments par flottaison étant rendu possible par leur faible masse volumique sèche (0.4 à 1) et par leur faible mouillabilité à pas de temps court (état hydrique et porosité, teneur en matière organique).

Un comportement un peu particulier est mis en évidence pour les horizons dégradés : le phénomène de battance est effectif bien que réduit. Les averses entraînent un aplanissement du micro-relief parcellaire, une augmentation de la stabilité (tri des agrégats par effet splash). Ainsi le ruissellement pourrait être favorisé par la formation d'organisations pelliculaires de surface des éléments les plus fins. En revanche, sur horizons Aa, la battance est quasi inexistante.

On notera que les horizons Aa, exploités à long terme de façon traditionnelle (géranium extensif, intrants faibles, sarclages répétés et non reconstitution du stock organique : parcelle GA), ont un comportement d'ensemble proche des sols à profil tronqué où Sa affleure.

Enfin, il faut souligner l'absence généralisée dans les horizons culturaux superficiels de structures construites et cohérentes de type mottes. Les agrégats, quel que soit leur taille, sont individualisés et peu solidaires entre eux.

Les quantités de terre exportées sont modérées (de l'ordre de 300 kg/ha/h), et sans commune mesure avec les masses de terre recueillies sur parcelles de Wischmeier (BOUGERE, 1988) atteignant plusieurs dizaines de tonnes par hectare pour une seule averse cyclonique (I30 de l'ordre de 30 mm). Cela implique que l'érosion la plus abrasive naît de processus de cumul et de la genèse de rigoles confluentes ou anastomosées à l'échelle pluri-parcellaire, avec une prise en compte de la pente.

Si l'on confirme que si les andosols n'ont pas intrinsèquement de prédisposition particulière à l'érosion (QUANTIN, 1972), les conditions de mise en culture et d'aménagement parcellaire apparaissent compromettantes, associées à des pentes fortes. De même, si on ne met pas en évidence d'effets des opérations culturales (travail du sol) sur le ruissellement et la charge solide exportée sous pluie simulée, le défrichement et la préparation des substrats en période climatique à risque occasionnent au champ les départs de terre les plus spectaculaires (BOUGERE, 1988).

III. Interactions entre le milieu et les opérations culturelles

1. L'anthropisation des horizons cultureux : opérations de préparation mécanisées et fonctionnements des sols

1.1. Le travail du sol dans les systèmes de culture sur andosols, généralités

1.1.1. Evolution des systèmes de culture et couverture pédologique

Trois grands systèmes de productions se différencient de plus en plus dans les zones de moyenne et haute altitude sur matériau andique :

- un système à base de production d'huile essentielle de géranium rosat, associant des cultures vivrières, et aujourd'hui principalement concentré dans les Hauts de l'ouest,
- un système d'élevage et de production fourragère, en plein développement,
- un système de productions horticoles (commercialisation) au sens large, qui se développe et s'intensifie.

La culture du géranium rosat a permis la mise en valeur agricole des sols de la zone de moyenne altitude sous le vent à partir de la fin du 19^{ème} siècle (sud à partir de 1860, ouest à partir de 1920). Au cours des dernières années, la culture traditionnelle itinérante avec jachère arborée (*Acacia decurrens*) s'est progressivement sédentarisée (BRIDIER, 1985 ; GARIN, 1987). Cette tendance s'est amorcée d'abord dans le sud et se généralise aujourd'hui, accompagnée d'une diversification des productions végétales et l'apparition d'une polyculture-élevage en pleine expansion.

Actuellement, les secteurs de production de géranium et des cultures vivrières et maraîchères associées, et les secteurs de production fourragère se succèdent, respectivement entre 700 et 1 000 m puis entre 1 000 et 1 300 m dans l'ouest, entre 500 et 1 000 m puis entre 1 000 et 1 800 m dans le sud.

Ces répartitions se calquent presque exactement sur les types de couverture pédologique définis par RAUNET (1988, 1991) : globalement, les systèmes de culture à base de géranium s'étendent sur les andosols désaturés non perhydratés, le système fourrager et l'élevage s'étendent sur les andosols désaturés perhydratés et les andosols cryptopodzoliques à mascareignite.

1.1.2. Le travail du sol dans les différents systèmes

La sédentarisation de la culture du géranium, la mise en valeur de nouvelles surfaces importantes, liée principalement au développement de l'élevage (défriche d'*Acacia meharensis*) et de l'horticulture, ont bouleversé les systèmes et le paysage dans les zones d'altitude de l'ouest et du sud. Ces changements se sont accompagnés d'un développement d'opérations mécanisées, principalement associées au défrichement, par le biais des différents programmes d'aides à l'agriculture cannière, étendus aux zones à géranium et élevage :

- Subventions à l'amélioration foncière du Plan de Consolidation de l'Economie Sucrière (PCES) et du Plan d'Aménagement des Hauts (PAH) : défrichement, épierrage, sous-solage, disquage lourd,

- Subventions au travail du sol pour lutter contre le ver blanc dans le cadre du PCES.

Ces opérations sont :

- quasi systématiques lorsqu'elles concernent l'amélioration foncière (sous-solage au buteur, passage de pulvérisateur à disques lourds ou à dents) et la préparation du sol en vue d'implanter des prairies (cultivateurs à disques ou à dents) ou des cultures maraîchères (cultivateur rotatif, charrue),
- plus sporadiques lorsqu'elles s'intègrent aux itinéraires techniques du système à géranium (préparation du sol à la charrue ou au cultivateur rotatif et/ou sillonnage).

Dans l'ouest et dans la plupart des cas, le travail du sol fait intervenir du matériel identique à celui du système de culture cannier (les interventions des groupements de la zone cannière -CUMA, SICA, REDETAR- sont subventionnées). Ce mode d'accès à la mécanisation satisfait aux contraintes socio-économiques de la zone (PIROT et OUF, 1987) :

- difficulté d'acquérir individuellement du matériel (trésorerie faible),
- faiblesse du niveau de technicité pour le mettre en oeuvre efficacement,
- réticences à l'acquisition et à l'utilisation de matériel en commun (associations informelles), interdisant le développement d'alternatives plus adaptées (motoculteur par exemple).

Le niveau de motorisation élevé (50-100 ch, adapté à la culture cannière) est en revanche peu compatible avec les fortes contraintes techniques, structurelles et édaphiques du système à géranium :

- importance des pentes,
- nature du substrat : andosol peu portant, sensible au cisaillement et à l'érosion pluviale (BROUWERS et RAUNET, 1981),
- structure des exploitations : parcellaire morcelé, parcelles de taille réduite, enclavées et éloignées, d'accès parfois difficile (MICHELLON et CHASTEL, 1988),

On notera que l'introduction de la mécanisation dans les autres opérations culturales du système à base de géranium a pris en compte ces contraintes : petite mécanisation non motorisée ou de faible puissance pour les opérations de semis des cultures associées, de traitements phytosanitaires, de récolte...

Le travail du sol s'intègre mieux au système fourrager malgré des contraintes de milieu identiques (technicité et motivation de la profession, structures et parcellaires adaptés) (PAILLAT, 1986).

1.1.3. Modalités techniques et motivations du recours au travail du sol

Deux types de préparation de sol sont réalisés, l'un est associé à l'amélioration foncière, l'autre s'intègre plus aux itinéraires techniques de production du géranium ou des cultures associées, des prairies, des cultures maraîchères.

□ mise en valeur foncière

Le premier type de travail du sol est réalisé éventuellement après le défrichement au buteur dans le cas de nouveaux terrains : un passage de pulvérisateur à disques lourds, souvent de type forestier, permet un nivellement et une homogénéisation du terrain chahuté par les chenilles du buteur. Cette

opération permet également de couper, d'écraser et d'enfouir grossièrement les résidus végétaux. Cet outil travaille le sol sur 15 à 18 cm (PAILLAT, 1986), l'action d'un cultivateur à dents rigides (parfois utilisé) est plus superficielle (10 - 12 cm) et très imparfaite : bourrage et entraînement des résidus.

Lorsque le sol est travaillé en conditions sèches, il devient rapidement soufflé, pulvérulent, sans structures construites préservées. En conditions humides ou sur sol perhydraté, toute intervention d'engins est difficile (patinage des cellules motrices, pénétration réduite des outils).

□ travail du sol avant implantation des cultures

Rappelons ici les objectifs justifiant habituellement le recours au travail du sol (MANICHON, 1973, 1988) :

AU PLAN DE LA FERTILITE :

- **émiettement du substrat**, augmentation de la macroporosité, action positive sur la circulation des fluides (eau gravitaire, air, chaleur), création de conditions structurales permettant l'expression du potentiel des semences et la progression des racines,
- **incorporation et mélange** des résidus végétaux, des fertilisants organiques ou minéraux,
- **enfouissement et destruction des adventices**,
 - dans le cas des andosols, ces objectifs peuvent s'inscrire dans un schéma plus global de réhabilitation, de restauration des horizons culturaux dégradés,
- **lutte contre les parasites** enfouis (destruction de larves: cas de *Hoplochelus marginalis*), ou en surface (limaces...)
- **dilution et mélange des reliquats de pesticides**, souvent concentrés en surface,

AU PLAN DE L'ITINERAIRE TECHNIQUE :

- **homogénéisation et nivellement général** de la parcelle, facilitant les opérations ultérieures en particulier si elles sont mécanisées (sillonage, plantation ou semis),
- **homogénéisation du profil cultural** et du comportement du peuplement végétal à venir, optimisant les opérations de récolte (calendrier d'intervention),
- **remodelage de la parcelle** : labour en planche (billonnage) pour assainissement (zone d'élevage des Hauts du sud et des Plaines), labour "en remontant" la terre travaillée pour contrecarrer l'érosion hydrique ou au contraire, aplanissement "en descendant" la terre pour constituer des terrasses.

Le travail du sol est réalisé soit avant l'installation des cultures à cycle court dans le cas de productions vivrières et maraîchères intégrées au système gérarium (quelques maraîchers possèdent une chaîne de préparation de sol : tracteur, cultivateur rotatif ou charrue, sillonneur), soit avant implantation de prairie, soit avant la mise en place de la culture du gérarium.

Dans les deux premiers cas, la préparation du sol en plein satisfait à certaines nécessités liées à l'enchaînement des opérations culturales (maîtrise des adventices et nivellement avant semis mécanisé, sillonage pour la localisation des apports minéraux ou organiques, incorporation en plein des amendements -chaux, matière organique-). Les opérations mécanisées de préparation des substrats de culture s'intègrent naturellement dans ces itinéraires, même si les opérations nécessitent encore des améliorations techniques

et économiques d'adaptations à des contraintes locales (gestion de la pierrosité, préservation du capital "sol" -semis direct des prairies- , confection de sols horticoles de qualité, calendriers d'intervention, essais et adaptation de nouveaux matériels...).

Dans le cas du géranium, les motivations sont conjoncturelles, souvent hasardeuses et favorisées par le contexte socio-économique (subventions aux opérations) :

- labour pour lutter contre le ver blanc (larve du hanneton *Hoplochelus marginalis*) (l'opération réalisée par les CUMA est subventionnée à 75%), SIEGMUND (1984) indique que le labour à la charrue à soc occasionne des blessures mortelles aux parasites enfouis, on élimine ainsi jusqu'à 80% des larves de hanneton, l'utilisation d'autres outils est beaucoup moins performante,
- labour pour lutter contre les adventices si l'agriculteur ne parvient plus à maîtriser l'enherbement en période de pointe de travail : la disponibilité en main d'oeuvre ne permet pas le sarclage en fin de saison humide et les plantes à multiplication végétative deviennent envahissantes (*Phalaris arundinacea*, *Oxalis sp.*, *Cyperus rotundus*...). Un labour bien versé en permet l'enfouissement mais d'autres adventices deviennent alors prédominantes dès que l'on retourne le sol (*Raphanus raphanistrum*) (MICHELLON, 1986),
- labour pour réhabiliter les horizons culturels dégradés, associé à des apports massifs de matière organique.

Dans les systèmes de culture à base de géranium, le recours à des solutions techniques inadaptées (issues des groupements canniers) dans un contexte édaphique et socio-économique difficile est la source d'une mauvaise adéquation assez générale entre les besoins réels des cultures (géranium et cultures vivrières) en matière de préparation des substrats et les outils utilisés. Seule la culture du tabac justifie une préparation profonde du sol, qui occasionne systématiquement des rendements de 10 à 15% supérieurs à ceux obtenus sur travail minimum (MICHELLON et GARIN, 1985). Les rendements du géranium et des autres spéculations vivrières du système sont très généralement moindres sous labour de l'horizon Aa, peu différents sous labour de l'horizon Sa affleurant, par rapport à des rendements obtenus après sillonnage simple ou plantation manuelle au trou.

Une évolution est d'ailleurs perceptible actuellement, conduite par la Recherche associée aux structures de Développement Agricole : l'augmentation de productivité (de la main d'oeuvre en particulier, principal point faible du système) passe par de nouvelles solutions répondant mieux à ces contraintes :

- intensification des itinéraires en utilisant mieux les intrants (gestion des pesticides, des fumures...),
- utilisation d'une mécanisation plus adéquate (non motorisée ou de niveau adapté) et concentrée sur les opérations de protection phytosanitaire, de semis, de récolte...
- gestion optimisée du capital "sol" dans un souci de limitation de l'érosion (aménagement parcellaire, opérations de semis avec travail minimum du sol ou semis direct sous couvertures...).

1.1.4. Description et comportement général des outils utilisés

Deux outils sont très généralement utilisés : la charrue à socs, équipée de versoirs hélicoïdaux (dans les conditions décrites plus haut) et le cultivateur rotatif à axe horizontal (systèmes maraîchers). Les

cultivateurs à dents et les outils à disques (pulvérisateur ou charrue) donnent des résultats médiocres, en particulier sur sol enherbé et en pente.

□ La charrue à soc

La charrue portée bisocs réversible demi-tour (versoires hélicoïdaux, 14 pouces -35.6 cm-) est habituellement utilisée (soc lame, sans coudre ni rasettes). Dans les conditions réunionnaises, le matériel utilisé est le plus souvent issu des groupements d'utilisation (CUMA, SICA) et les réglages indispensables des liaisons tracteur - outil - milieu (pentes) ne sont pas toujours assurés pour chaque chantier (voie du tracteur, aplomb, talonnage, déport...), la qualité du travail dépend de ces réglages, de la vitesse, de l'état de surface et du type d'horizon affleurant (BARTHELEMY et al., 1987 ; SIEGMUND, 1988). Un broyage préalable est souvent indispensable si les résidus du précédent cultural sont importants. Sur sols andiques, les principales caractéristiques du travail réalisé sont :

- travail profond (30 à 40 cm) et généralement très émietté, les socs remontent de gros blocs d'horizon Sa en surface, voire de tuf arrachés en profondeur dans les sols très dégradés,
- état de surface motteux (si Sa affleure) et très chahuté, nécessitant une reprise pour obtenir un lit de semence satisfaisant,
- mauvaise stabilité de l'outil dans le sol, le glissement du tracteur est important, sa puissance semble mal utilisée,
- forte adhérence de la terre aux pièces travaillantes (GARON, 1990 ; DANFLOUS, 1991),
- localisation des végétaux enfouis en bandes (labour dressé),

Lorsque l'horizon andique d'altération Sa massif affleure, le retournement et l'enfouissement ne sont plus réalisés correctement, compte tenu de l'adhérence du matériau aux pièces travaillantes (GARON, 1990). La charrue pousse la matériau et occasionne un état de surface sillonné.

GARON (1990) a expérimenté différents types de versoires sur andosol non perhydraté (Tan Rouge, 800 m d'altitude, hauts de l'ouest) : hélicoïdal long (le plus utilisé localement), claire-voie, cylindrique court, universel court, universel long. Des mesures de collage de terre aux pièces travaillantes (socs et versoires) ont été réalisées par pesée, ainsi que des observations concernant la qualité du travail : retournement, enfouissement des résidus, collage. Les données obtenues montrent l'intérêt de versoires à claire-voie (surface de contact réduite), et dans une moindre mesure, de versoires universels courts. Ceux-ci permettent un retournement plus efficace, un enfouissement homogène et laissent un sol plus nivelé (terre bien jetée) avec un collage moindre. La profondeur moyenne de labour est cependant moindre avec les versoires universels courts. La puissance aux roues développée par le tracteur est mesurée lors de ces essais. On montre que celle-ci est très dépendante de la profondeur de travail et de la pente. Un ensemble de résultats sont consignés en figure III.51.

Avant sillonnage manuel ou mécanisé pour implanter les cultures, une reprise est nécessaire pour niveller et briser les mottes superficielles. Elle est manuelle et très grossière (travail au croc sur petites parcelles) ou réalisée au cultivateur à dent ou au vibroculteur.

Figure III.51. Performances comparées d'ensembles tracteur-outils en conditions réelles de travail du sol sur andosol non perhydraté (Tan Rouge, 800 m, ouest) (d'après GARON, 1990)

Type d'outil	Consommation horaire du tracteur (l/h)	Puissance moyenne aux roues (kw)	Vitesse moyenne (km/h)	Profondeur (cm) moyenne	Poids total de terre collée aux socs et versoirs (kg) (1)
Charrue bisoc :					
v. hélicoïdaux longs	4.87	13.11	3.22	14.4	27.75
v. claire voie	5.56	16.7	3.24	17.2	10.5
v. cylindriques courts	5.94	18.33	3.39	18.7	15.17
v. universels courts	4.98	14.92	3.27	13.6	10.58
v. universels longs	5.13	15.91	3.08	18.6	12.05
Machine à bécher	4.8	12.43	2.18	20 (2)	-

(1) Moyenne de deux pesées sur 10 m linéaires de déplacement de l'outil.

(2) valeur estimée sur profils après travail

Teneur en eau volumique moyenne lors du travail : 0.60

Masse volumique apparente sèche lors du travail : 0.5

(mesures gravimétriques entre 10 et 15 cm de profondeur)

☐ Le cultivateur rotatif à axe horizontal

Le cultivateur rotatif à axe horizontal est utilisé pour préparer directement le semis des cultures maraîchères et non pas en reprise de labour.

Cet outil découpe le sol par des lames incurvées à angle arrondies montées sur un rotor (axe horizontal) perpendiculaire au sens d'avancement. La puissance est transmise par prise de force.

L'affinage dépend essentiellement de la vitesse du rotor (120 à 400 t/min.) et de la vitesse d'avancement (BARTHELEMY et *al.*, 1987 ; PAILLAT, 1988). Compte tenu de la faible cohésion des horizons superficiels de sols andiques, l'affinage est toujours très important, encore accentué par l'utilisation systématique d'un tablier qui moule les planches maraîchères.

En zones érodées, l'outil ameublir efficacement le substrat andique massif et y incorpore résidus et matière organique. Il laisse un sol excessivement émietté, voire réduit en poussière à l'état sec (soufflé) et après plusieurs cycles cultureux d'utilisation. Ce matériau sablo-limoneux (dessiccation irréversible) est peu fertile et facilement mobilisable par les eaux de ruissellement (capacité de rétention en eau réduite, minéralisation accélérée de la M.O.). L'utilisation abusive de ces outils dans les Hauts du sud est directement responsable de l'érosion intense qui s'y produit. Cet outil est très utilisé dans cette zone : il permet en un seul passage d'obtenir un émiettement très important, une surface plane et homogène, d'enfouir et de pulvériser les résidus de culture et les adventices, et donc de réaliser directement un semis.

Les outils utilisés travaillent sur une largeur de 2 à 2.5 m, la profondeur est contrôlée par patins. On note les caractéristiques suivantes :

- profondeur de travail moyenne (20 cm) et variable, en particulier si le tuf est affleurant, les lames glissant sur les couches les plus dures sans pénétrer,
- le sol est réduit en une poudre fine, les agrégats les plus grossiers et la macrofaune étant détruits, la couche de sol travaillée est facilement mobilisable par les eaux de ruissellement mais aussi par le vent en conditions sèches.

Il faut noter que le sarclage à la grappe, traditionnel, généralisé et pratiqué en exportant systématiquement les résidus des adventices hors de la parcelle (andains), conduit aux mêmes conséquences, sur une profondeur moindre.

☐ La machine à bêcher

L'introduction récente de machines à bêcher fournit une alternative intéressante en matière de préparation de substrats horticoles sur sols andiques (GARON, 1990 ; PERRET et *al.*, 1991). Cet outil animé par prise de force à des pièces travaillantes (8 bêches pour une largeur de travail de 1.9 m) commandées par maneton et vilebrequin, elles s'enfoncent et découpent une tranche de sol qui est projetée vers l'arrière. Les possibilités en sont très étendues (boîte de vitesse sur l'outil, tablier réglable) (BARTHELEMY et *al.*, 1987).

En sols andiques, le passage de l'outil laisse un substrat émietté, des mottes centimétriques sont réparties à la surface et dans le profil, la réalisation du semis ne nécessite pas de reprise. Les caractéristiques principales sont les suivantes :

- profil homogène dans la répartition des structures, généralement très émiettées, et des résidus,

- profondeur importante et homogène (30 cm) contrôlée par patins, en zone érodée, les bêches arrachent et fragmentent des morceaux de matériau Sa, voire de tufs, le fond de travail n'est pas lissé ni compacté,
- puissance de la cellule motrice utilisée de façon optimale, le tracteur glisse peu, il est "poussé" par le mouvement des bêches,
- enfouissement médiocre lorsque la parcelle présente un enherbement important, un broyage préalable est alors conseillé,
- action efficace en terres collantes et/ou très humides (andosols).

L'émiettement dépend de la vitesse de rotation, de la vitesse d'avancement (généralement lente -1 à 2.5 km/h- qui détermine l'épaisseur des tranches découpées) et du tablier sur lequel sont projetées les tranches. Les bêches utilisées sont trapézoïdales.

GARON (1990) a expérimenté cet outil sur andosol, les données relatives aux performances sont comparées à celles obtenues avec la charrue (figure III.51.).

1.2. Façons culturales et évolutions du sol : cas d'un andosol perhydraté

Les résultats exposés ici sont issus d'expérimentations au champ sur andosols, en milieu paysan sur le site de Piton Hyacinthe (Hauts du sud, 1 200 m, andosol désaturé chromique perhydraté, très dégradé).

1.2.1. Profil cultural

Lors d'essais d'itinéraires de préparation de substrats, l'impact des différents outils sur quelques caractéristiques du profil cultural de sols andiques a été décrit et mesuré.

Le profil initial était constitué d'une couche superficielle (10 - 15 cm) à forte dominante particulaire (W proche de 60%), avec quelques structures construites peu cohérentes liées au tissu racinaire de la friche herbacée précédente. Un horizon Sa massif et plus humide (W proche de 100%) affleure sous cette couche, localement le tuf est présent dès 15 à 20 cm, l'érosion ayant décapé les horizons sus-jacents. La parcelle avait été abandonnée à une friche herbacée depuis quelques cycles en raison de la baisse de fertilité enregistrée malgré les apports en matière organique (400 t/ha), de la difficulté à travailler le sol (substrat soufflé et très érosif généré par l'utilisation de cultivateur rotatif dont la profondeur de travail est irrégulière et qui n'attaque pas le tuf), de problèmes phytosanitaires très importants (nématodes) liés à l'assolement maraîcher exclusif pratiqué.

□ Charrue à socs

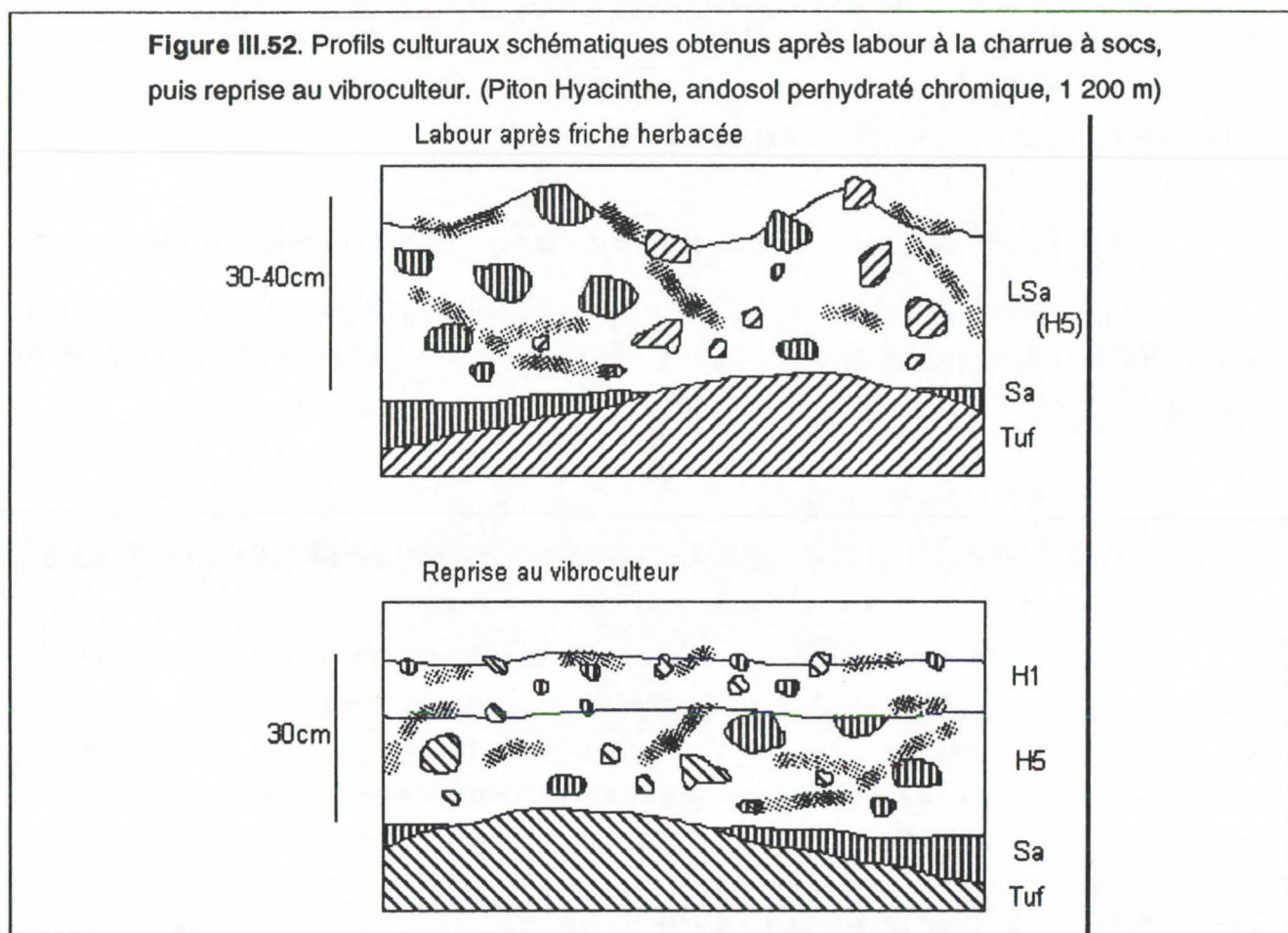
La profondeur travaillée est importante, 30 à 40 cm en foisonné. Une partie de l'horizon d'altération Sa est touché par les socs et se retrouve dans la couche culturale sous forme de mottes. Cependant, l'observation du profil révèle la forte prédominance de terre fine, 50 à 60% du poids total sec de la couche travaillée sont constitués d'agréats de taille inférieure à 10 mm.

Des blocs centimétriques à décimétriques de tuf peuvent être arrachés en profondeur et sont remontés. Les débris végétaux restent en paquets soit sur le fond de travail (retournement), soit dans le profil, soit en surface (traînés par les socs). L'état de surface est très irrégulier, on retrouve d'une part la trace nette des différents passages (succession de crêtes et de creux), et d'autre part les blocs de tuf ou

d'horizon Sa. Localement, les socs peuvent glisser sur le tuf sans l'éclater, limitant ainsi la profondeur travaillée.

Après reprise au vibroculteur, la partie superficielle de la couche labourée est encore émiettée sur 10 à 15 cm, la surface est nivelée. Seuls subsistent presque en l'état les blocs de tuf, trainés et remontés, ainsi que les résidus localisés vers la surface.

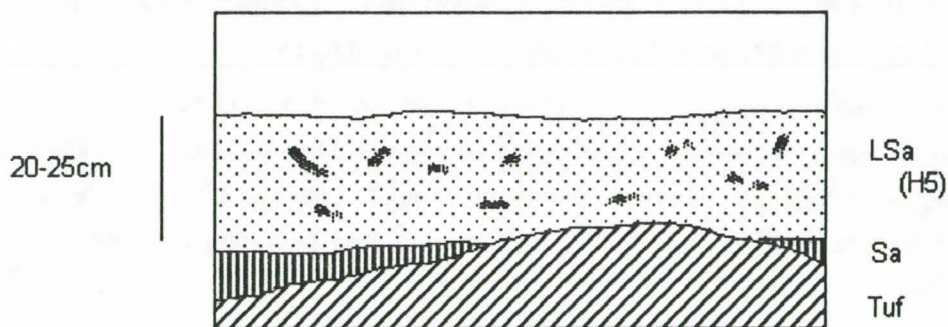
Sur la figure III.52., les profils culturaux obtenus ont été schématisés. La teneur en eau pondérale du sol au moment du labour à la charrue à socs était de 66% (moyenne de 10 mesures gravimétriques entre 5 et 10 cm) et de 60% avant reprise au vibroculteur.



☐ Cultivateur rotatif à axe horizontal

Le matériau, les résidus végétaux et les adventices, ainsi que la macrofaune (lombrics) sont broyés et mélangés en une couche travaillée particulière homogène de 20 à 25 cm. Il ne persiste ni motte ni agrégat centimétrique (70 à 80% du poids total de matériau sec est constitué de structures de dimension inférieure à 10mm). Le fond de travail est assez régulier lorsque le matériau andique d'altération est suffisamment profond; en revanche, les affleurements de tuf limitent la profondeur de travail car les dents animées incurvées glissent sur le tuf (Figure III.53.). Une reprise de ce travail au vibroculteur est inutile, elle nuit même au nivellement superficiel du lit de semence.

Figure III.53. Profil cultural schématique obtenu après passage de cultivateur rotatif (400 t/min. axe, tablier baissé). (Piton Hyacinthe, andosol perhydraté chromique, 1 200 m)

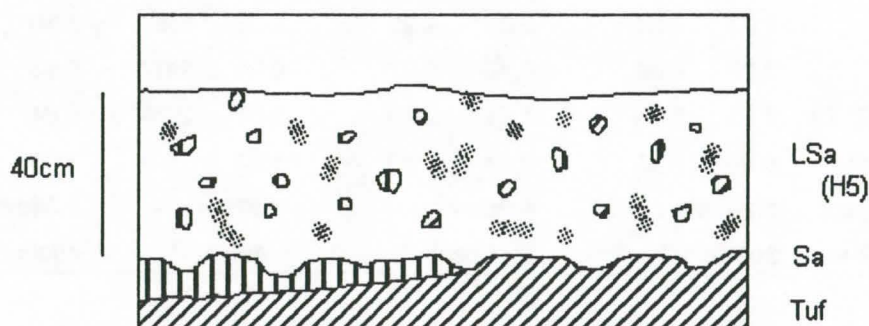


□ Machine à bêcher

L'ensemble de la couche travaillée est émiettée, finement motteuse, uniforme. Les débris végétaux sont mélangés et répartis sous forme de petits paquets irréguliers. On trouve des morceaux de l'horizon Sa et éventuellement des petits blocs centimétriques de tuf répartis sur toute la couche (60 à 70% du poids de terre sèche est constitué d'agréats inférieurs à 10 mm).

La profondeur travaillée est importante (40 cm en foisonné) et très régulière, même lorsque le tuf est près de la surface : les bêches l'ont ébranlé et ont arraché des blocs de tuf. Ce profil a été obtenu avec une vitesse de rotation de 1500 t.min.⁻¹ à la prise de force (soit 140 t.min.⁻¹ au vilebrequin), et le tablier arrière de la machine relevé (Figure III.54.). Une vitesse supérieure a été testée (1700 t.min.⁻¹) avec le tablier baissé : l'émiettement est supérieur, le profil est très proche de celui obtenu avec le cultivateur à axe horizontal.

Figure III.54. Profil cultural schématique obtenu après passage de machine à bêcher (1500 t/min. pf, 140 t/min. vilebrequin ; tablier relevé). Piton Hyacinthe, andosol perhydraté chromique, 1 200 m



Pour l'ensemble de ces outils et conformément aux caractéristiques mécaniques des matériaux, on n'observe pas de lissages (compactions localisées du matériau) ni de formation de mottes compactées de porosité réduite (mottes Δ, MANICHON, 1982).

Après deux cycles de culture, une nouvelle préparation de sol selon les mêmes itinéraires montre des résultats similaires. Les différences observées concernent la zone labourée sur laquelle il ne subsiste plus de blocs de tuf ou de mottes de matériau Sa de dimension décimétrique, fragilisés et en grande partie désagregés naturellement par les alternances climatiques.

Enfin, il faut souligner la faible durabilité des états structuraux générés par le travail profond à la charrue ou à la machine à bêcher en sols perhumides érodés. A partir de 15 cm, le matériau Sa protégé du séchage climatique se fond progressivement en une matrice continue. Le comportement racinaire des cultures et le fonctionnement hydrodynamique du matériau (voir plus loin) attestent de cette reprise en masse du matériau.

1.2.2. Etat de surface et foisonnement

L'état de surface du sol détermine la nécessité et la facilité d'effectuer une reprise en vue d'implanter la culture. Il constitue également un des facteurs susceptibles de limiter le ruissellement superficiel des eaux de pluie, puisque ces opérations sont généralement réalisées en fin de saison cyclonique.

Afin de caractériser précisément la rugosité superficielle du matériau et le foisonnement liés aux outils, le dispositif d'aspérimétrie décrit au chapitre II.3.3. a été mis en oeuvre. La variation ponctuelle d'altitude entre l'état initial de surface et l'état après passage des différents outils est mesuré selon un maillage de 10x5 cm, sur un cadre de 100x90 cm, soit 209 points de mesure (19 aiguilles, déplacées dans les sens de passage des outils selon 11 segments). La différence d'altitude moyenne entre la surface initiale et la surface de la couche travaillée fournit un foisonnement moyen pour la surface considérée. Le dispositif permet de mesurer des variations d'altitude relative réelles puisque le rugosimètre repose sur des parpaings non perturbés par le passage des engins.

Figure III.55. Rugosité superficielle et foisonnement moyen obtenus par différents outils de travail du sol

	Labour :		Cultivateur rotatif		Machine à bêcher (régime p-f) :			
	Charrue à socs		(400 t/min.)		1500 t/min.		1700 t/min. + tablier	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
IR ₁	1.93	24.5	2.32	4.23	2.22	5.68	1.43	3.26
IR ₂	0.78	6.09	0.83	1.97	0.91	1.97	0.43	1.51
Rugosité globale (E.T.)	1.55	5.54	1.41	2.29	1.54	2.29	0.84	1.41
Altitude rel. moyenne	6.99	8.28	3.58	7.83	4.37	13.3	2.53	7.88
Foisonnement moyen	1.29cm		4.25cm		8.93cm		5.35cm	
Profondeur travaillée	30-40cm		20-25cm		40cm		40cm	

La rugosité est évaluée de façon globale par un paramètre de dispersion sur la population d'altitudes relevées après travail : l'écart type ; et de façon directionnelle par l'indice de rugosité IR% calculé :

- perpendiculairement au passage des outils, soit dans le sens de la pente parcellaire (IR₁) : d=5 cm,
- dans le sens du passage des outils (IR₂), soit perpendiculairement à la pente : d=10 cm.

Les calculs sont détaillés dans cette troisième partie, au chapitre II.3.3. Le tableau III.55. relate l'ensemble des résultats obtenus.

L'état de surface pour chaque passage d'outil a été tracé après interpolation polynomiale des valeurs ponctuelles d'altitude (DELHOMME, 1976; Golden Software Inc, 1990). La cellule motrice et l'outil sont passés selon le plus grand axe (100 cm).

Ces représentations en trois dimensions visualisent les états de surface en une image déformée de la réalité compte tenu de l'obtention ponctuelle des données (Figures III.56-57-58.).

Figure III.56. : Rugosimétrie : état de surface après passage du cultivateur rotatif à axe horizontal (400 t/min.)

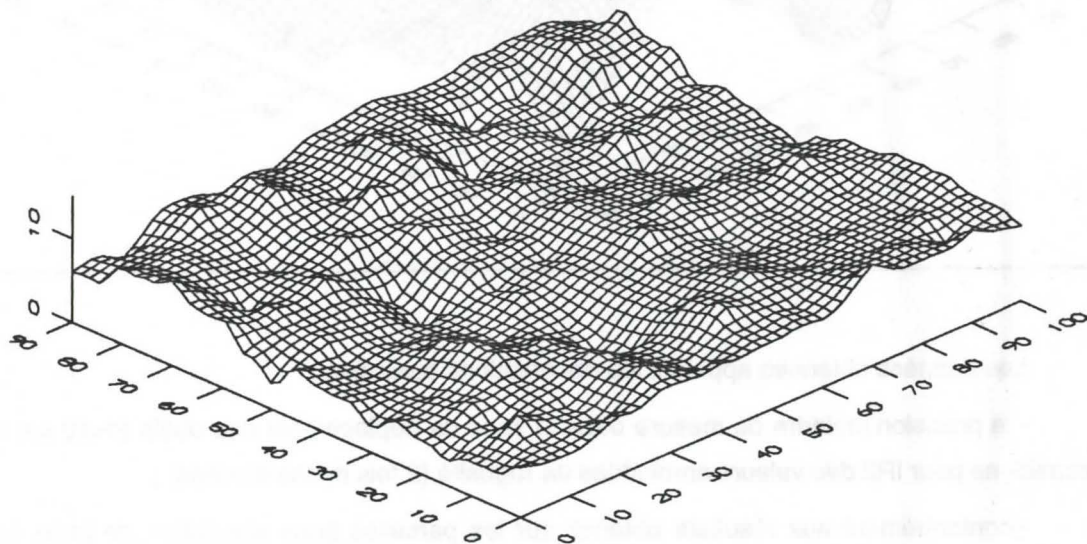


Figure III.57. : Rugosimétrie : état de surface après passage de la machine à bêcher (1500 t.mn-1, tablier relevé) :

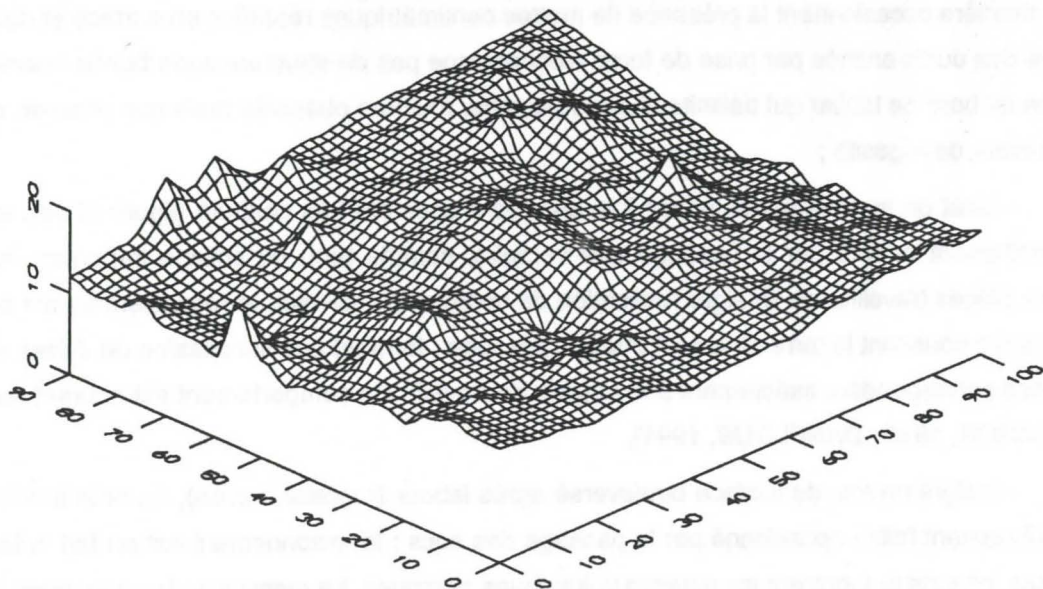
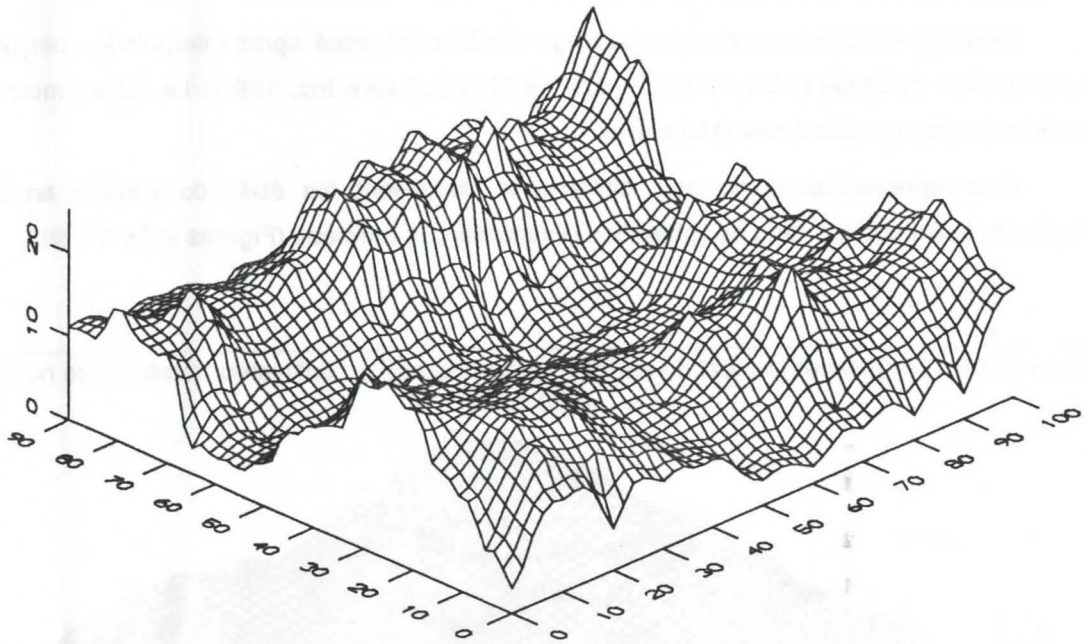


Figure III.58. : Rugosimétrie : état de surface après passage de la charrue à socs :



Les données obtenues appellent les observations suivantes :

- la précision moindre de mesure dans le sens de déplacement des outils ($d=10$ cm au lieu de 5 cm) occasionne pour IR2 des valeurs amoindries de rugosité (2 fois moins élevées) ;
- conformément aux résultats obtenus sur les parcelles sous simulation de pluie, la rugosité initiale est faible ($IR\% < 2.5\%$) ;
- les effets des différents outils sur le microrelief peut être regroupé en deux modalités : charrue à socs et outils animés ;
- l'aspect général est très proche entre cultivateur rotatif et machine à bêcher (figures III.56-57.), cette dernière occasionnant la présence de mottes centimétriques réparties en surface et dans le profil. Le passage des outils animés par prise de force n'occasionne pas de structure superficielle orientée, mise à part la trace de bord de tablier qui délimite chaque planche, toujours observée mais non prise en compte sur le m^2 de mesure de rugosité ;
- l'état de surface après labour à la charrue à socs est très chahuté (figure III.58.) et le microrelief est nettement orienté par le passage des versoirs, compte tenu du collage important du matériau andique aux pièces travaillantes (malgré l'utilisation de versoirs claire-voie), le retournement est mal réalisé. Socs et versoirs poussent la terre de côté à chaque passage, formant une succession de crêtes et de creux (de fréquence correspondant exactement à la largeur de travail). Ce comportement est courant sur matériau andique (GARON, 1990 ; DANFLOUS, 1991),
- malgré un état de surface bouleversé après labour (rugosité élevée), on note le foisonnement moyen extrêmement faible occasionné par le passage des socs ; le foisonnement est en fait très important sur les crêtes, comme le montrent les masses volumiques obtenues. La mesure du foisonnement moyen sur le m^2 est tributaire de la position de ce carré élémentaire, compte tenu du déplacement important de sol occasionné par le labour, il est hétérogène latéralement et surtout dans le sens de travail (collages-décollages de terre, bourrages...).

- le foisonnement moyen le plus important est occasionné par la machine à bêcher, à 1500 t.min.⁻¹ et tablier relevé ; l'aplanissement est optimum lorsque le tablier est baissé et à 1700 t.min.⁻¹.

Il apparaît que l'utilisation de la charrue nécessite impérativement une reprise superficielle (généralement pratiquée au cultivateur à dents flexibles, parfois encore manuelle dans les Hauts de l'ouest).

Après deux années de culture selon les mêmes itinéraires, il est apparu nettement que si cette reprise ne permettait pas de fragmenter totalement et de répartir convenablement les blocs décimétriques de matériau Sa, voire de tuf, remontés dans l'horizon cultural après un premier labour "de restauration", le profil cultural obtenu lors de la seconde année était nettement plus affiné (tuf et blocs de Sa ayant subi une dessiccation).

Cependant, l'ensemble de l'itinéraire avec charrue ne peut permettre la réalisation optimale de lits de semence maraîchers sur sols dégradés, particulièrement pour les petites graines.

Dans les zones à forte pente, l'obligation de travailler en courbe de niveau occasionne des difficultés importantes, essentiellement au plan du comportement de la cellule motrice.

1.2.3. Répartition des phases du sol : porosités

Les mesures de teneur en eau et de masse volumique, couplées à des infiltrations à succion contrôlée fournissent des données concernant l'évolution du matériau selon les différents itinéraires techniques. Le mode de calcul de la porosité active dans l'écoulement et la rétention de l'eau est décrit dans la seconde partie du document (chapitre IV.1.).

Le tableau III.59. donne les résultats de porosité totale ($n = V_v / V_t$) et de masse volumique apparente sèche ($\gamma_d = W_s / V_t$) obtenus à saturation, pour le matériau fraîchement travaillé :

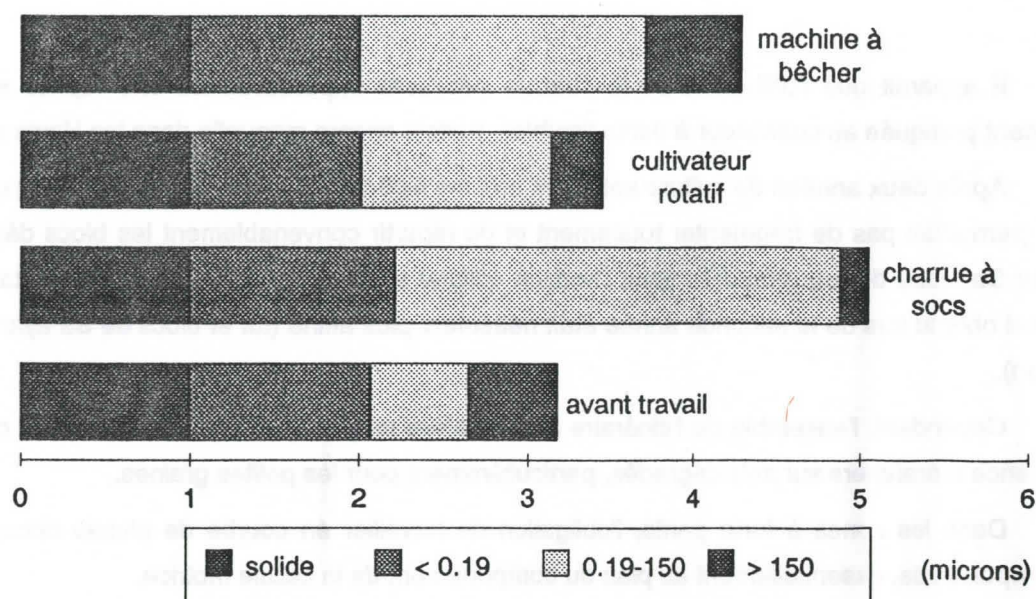
Figure III.59. Porosité totale n et masse volumique apparente sèche mesurées juste après travail

	Porosité totale n	Masse vol. app. sèche
Avant travail	68.6%	0.79
Charrue à socs *	80.2%	0.50
Cultivateur rotatif	71%	0.73
Machine à bêcher	76.7%	0.58

* mesure effectuée sur les crêtes

L'émiettement très important créé par le cultivateur rotatif ne génère pas une augmentation nette de la porosité totale. Le mélange de terre fine et de mottes occasionné par la charrue ou la machine à bêcher s'avère globalement beaucoup plus poreux. Sur les crêtes occasionnées par le labour à la charrue, des mottes issues du matériau Sa affluent fréquemment, les valeurs de porosité et de masse volumique reflètent plus ce fait qu'un réel ameublissement du substrat (réduction de la macroporosité). Ces résultats ne sont donc pas forcément contradictoires avec les foisonnements moyens mesurés.

Figure III.60. : porosités exprimées en fonction d'un volume de solide constant



La réorganisation du matériau est différente selon l'outil. En particulier pour les taille de pores de rétention capillaire (entre 0.19 et 150 μm , l'eau retenue est utilisable par les plantes -entre pF 1.3 et pF 4.2-) et pour les macropores (les pores de diamètre supérieur à 150 μm participent principalement à la circulation rapide des fluides : eau gravitaire, air, chaleur).

Globalement, la gamme de pores de 0.19 à 150 μm voit sa proportion augmenter par rapport à l'état initial. Cela est particulièrement net sur les crêtes du labour à la charrue à socs.

L'action de la machine à bêcher occasionne une augmentation importante de cette porosité de rétention de l'eau, les deux autres catégories de pores conservent la même proportion.

Figure III.61. Répartition dimensionnelle de la porosité selon les outils

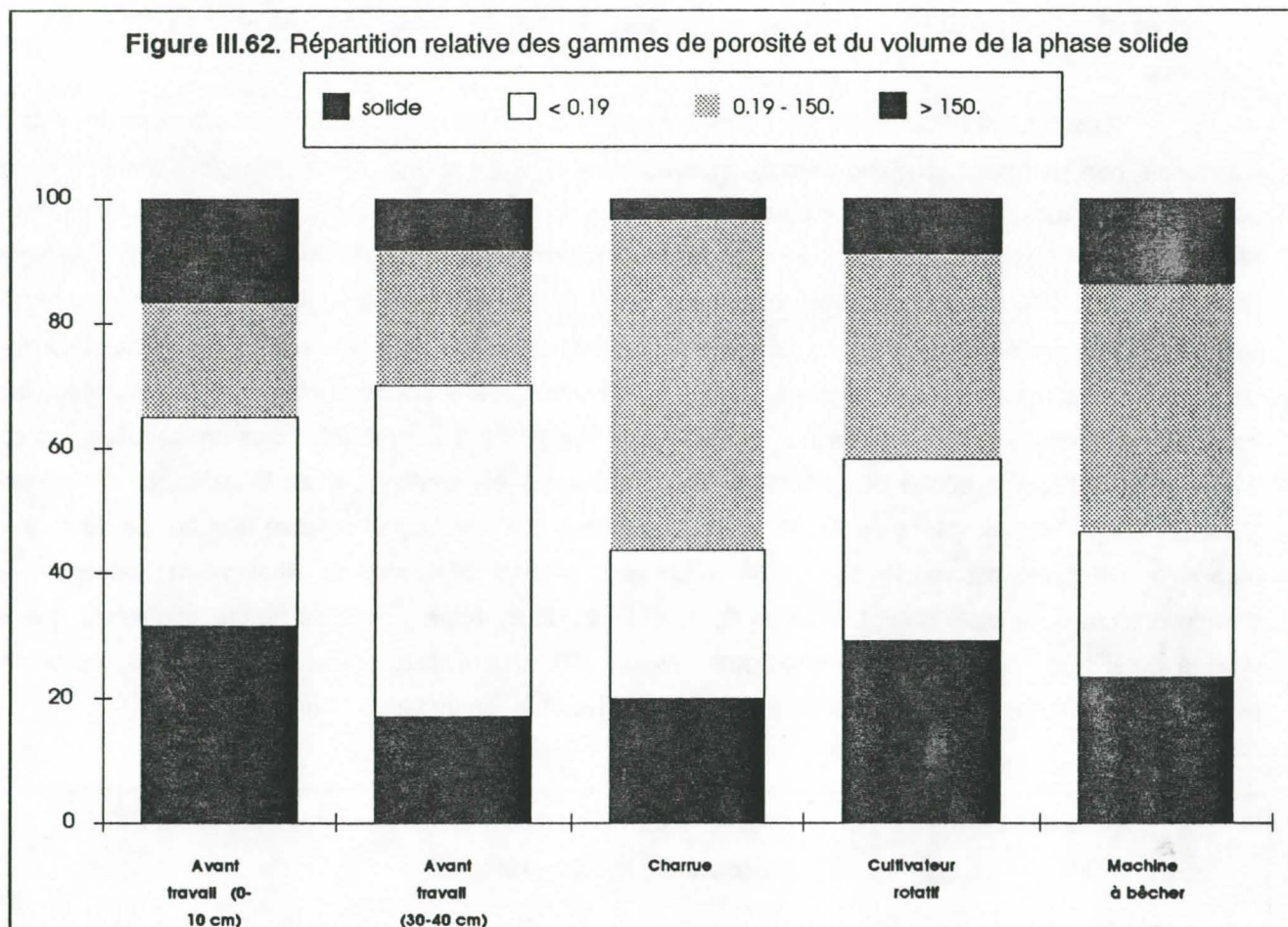
Diamètre des pores :	> 150 μ	0.19 μ - 150 μ	< 0.19 μ
Avant travail (mesure à 0 - 10 cm)	24.3%	26.7%	49.0%
Avant travail (mesure à 30 - 40 cm)	09.9%	26.0%	64.1%
Charrue à socs (mesure à 0 - 10 cm) *	04.2%	66.0%	29.8%
Cultivateur rotatif (mesure à 0 - 10 cm)	12.5%	46.2%	41.3%
Machine à bêcher (mesure à 0 - 10 cm)	17.8%	51.7%	30.5%

* mesure effectuée sur les crêtes

Le cas du labour à la charrue est particulier : les mesures ont été effectuées sur les crêtes ménagées à chaque passage, le foisonnement et la porosité y sont maximales, alors que le foisonnement moyen, obtenus sur l'ensemble est très faible. La microporosité y est plus importante, la macroporosité plus faible (figures III.60-61.), reflétant ainsi la présence du matériau Sa dans l'horizon cultural sous forme de mottes décimétriques (figure III.62.).

Le labour profond à la charrue à soc génère donc une porosité particulière, héritée d'une part de la porosité très fine présente dans les blocs de matériau Sa remontés, et créée par le fractionnement des structures de la couche superficielle.

On notera que le cultivateur rotatif contribue également à réduire la macroporosité, peut-être en raison de l'émiettement excessif.



1.3. Travail du sol et répartition des phases : évolutions spatiales et temporelles

Des manipulations concernant la variabilité spatiale et temporelle des variables d'état caractérisant la répartition des phases du sol, ont été conduites, en station expérimentale sur les sites de Trois Bassins et de Fond Jardin (Hauts de l'ouest, 1 000 m, andosol désaturé chromique).

1.3.1. Répartition des phases du sol : évolution temporelle dans des profils

Sur les sites expérimentaux de Trois Bassins-Cocâtre et Fond Jardin, des itinéraires techniques de cultures vivrières (rotations bisannuelles haricot-maïs) sont conduits sur des parcelles contiguës, ils diffèrent uniquement par le mode de préparation du sol réalisé en fin de saison cyclonique (mars) : labour à la charrue à soc avant le premier cycle (haricot) puis sillonnage, ou simple sillonnage. Les itinéraires ont été détaillés au chapitre II.3.1.

Des mesures successives et localisées à la sonde gamma-neutronique permettent d'accéder aux valeurs de W , γ_d et θ . Une chronique de leur évolution selon les deux itinéraires est donc établie.

Selon un maillage de mesure repéré et chevauchant les deux itinéraires, un dispositif de mesure de ces paramètres est également réalisé, à des temps différents. Les évolutions spatiale et temporelle peuvent être abordées.

□ Profils de répartition volumique des phases, profils de masse volumique et de teneur en eau

Les figures III.63. et III.64. représentent les profils d'indices d'eau θ et d'indices de vide e d'andosols non perhydratés (Fond Jardin), cultivés sans travail profond du sol (simple sillonage avant semis). Ces valeurs sont calculées à partir des données de masse volumique apparente humide γ_w et de teneur en eau volumique θ mesurées à la sonde gamma-neutronique ; et des données de poids spécifique γ_s . Ces profils relatent les proportions volumiques d'eau et d'air relatives à la phase solide, constante du système. On observe que la répartition des phases est, d'une part très différente entre horizon Aa et horizon Sa sous jacent dans un sol non dégradé, d'autre part conforme aux données obtenues en laboratoire sur échantillon centimétriques non remaniés (partie II, chapitre IV.1.). La distribution des phases dans un sol dégradé (Sa affleurant, séché et particulaire, sur Sa massif) est similaire, mais la présence d'éléments grossiers en profondeur (blocs de tuf et de basalte altéré) diminue la part relative des fluides. Malgré le caractère nettement différencié des profils culturaux en deux horizons, on observe la concomitance d'évolution, quasi parallèle dans tout le profil, de l'eau et du système poral. On notera également que le volume poral très important n'est rempli qu'à environ 70% d'eau, malgré une structure massive microporeuse (particulièrement pour Sa) et un état hydrique favorable (fin de saison cyclonique).

Figure III.63. Profils d'indices d'eau θ et de vide e d'un andosol non dégradé (Aa sur Sa)
(Fond Jardin, le 11/05/1989).

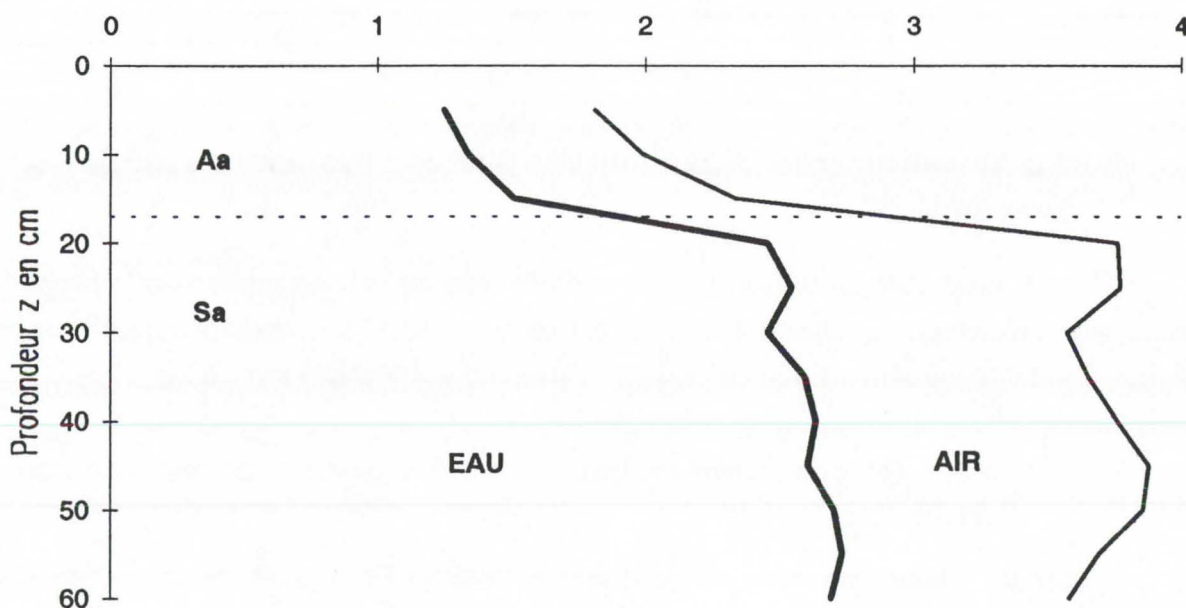
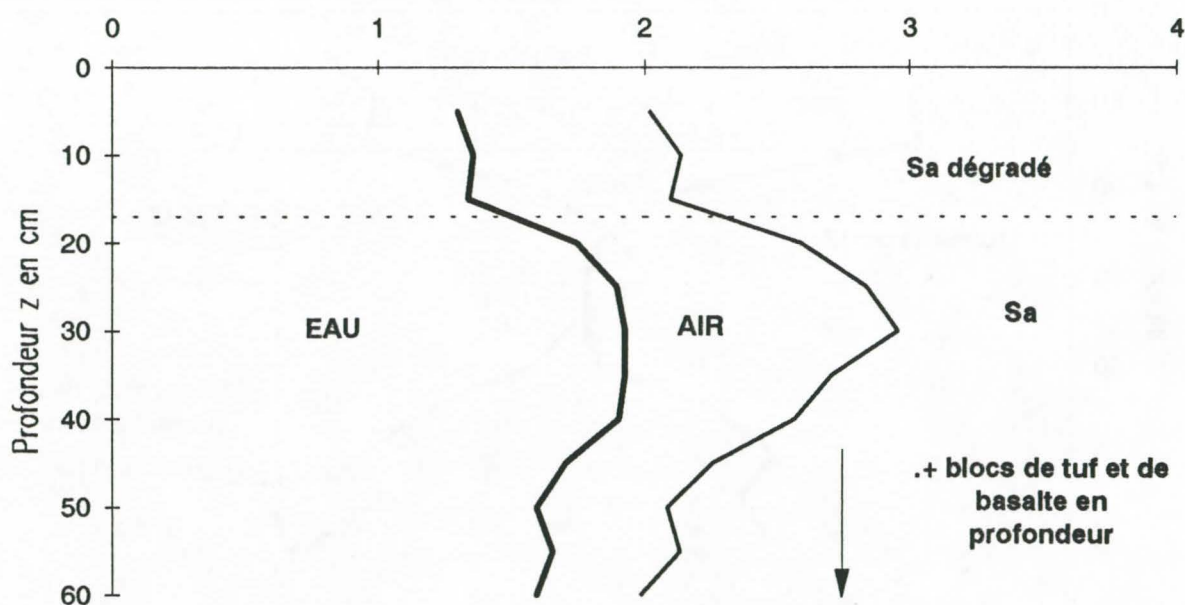


Figure III.64. Profils d'indices d'eau θ et de vide e d'un andosol dégradé (Sa dégradé sur Sa)
(Fond Jardin, le 11/05/1989)



La traduction de ces répartitions en paramètres plus usités en agronomie permet d'établir des profils de masse volumique sèche et de teneur en eau pondérale (figures III.65-66.).

Figure III.65. Profils de masse volumique sèche γ_d et de teneur en eau pondérale W
d'un andosol non dégradé (Aa sur Sa) (Fond Jardin, le 11/05/1989).

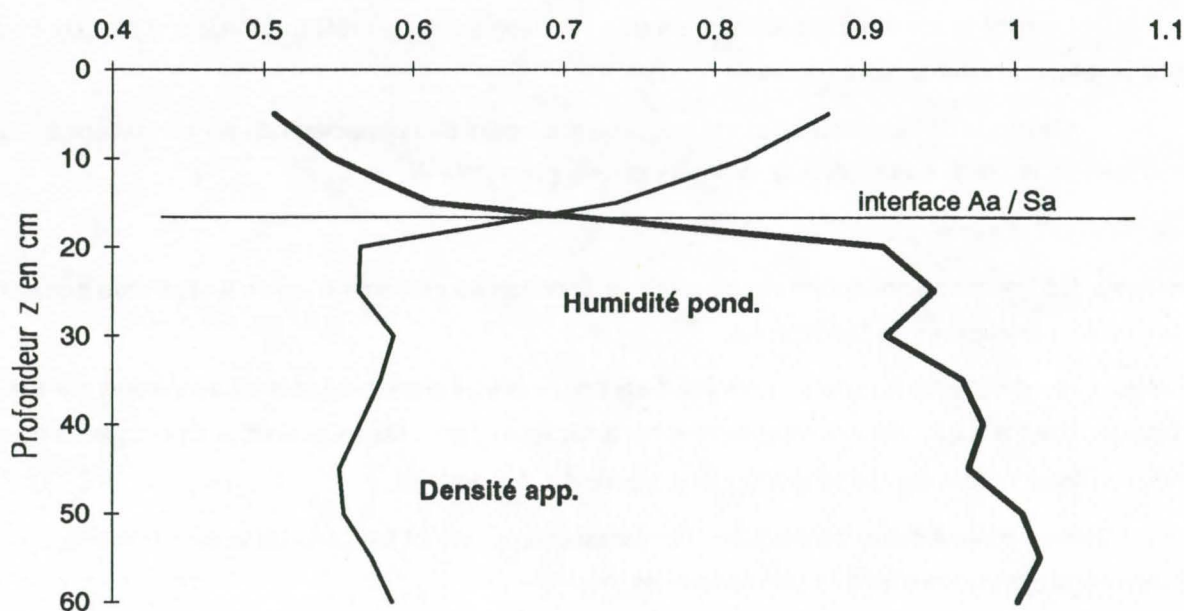
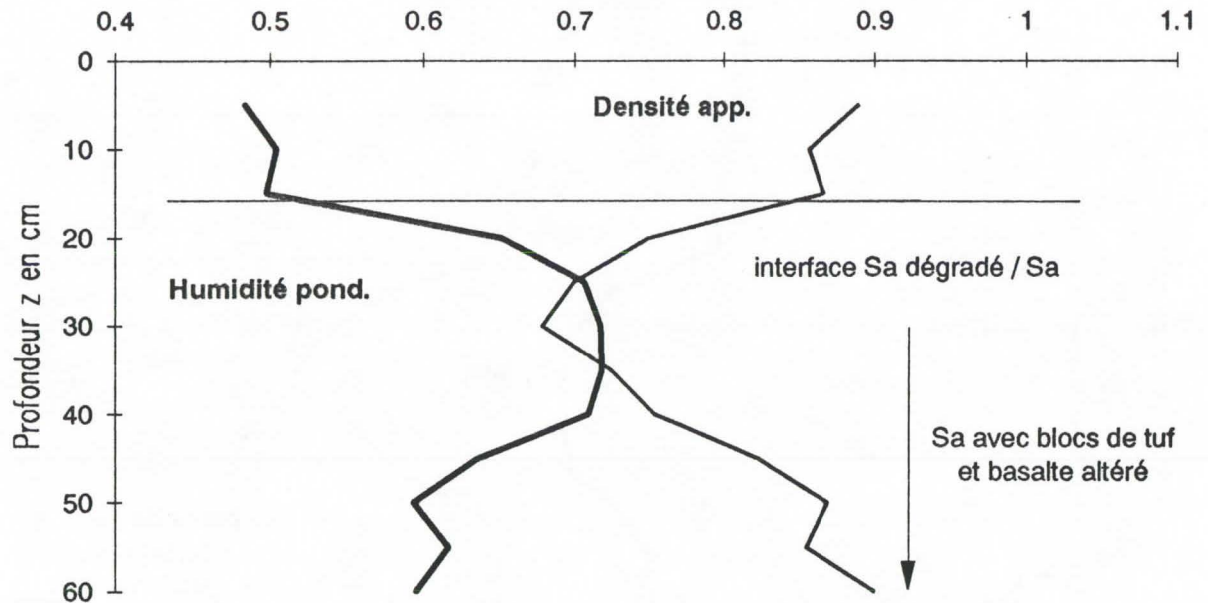


Figure III.66. Profils de masse volumique sèche γ_d et de teneur en eau pondérale W d'un andosol dégradé (Sa dégradé sur Sa) (Fond Jardin, le 11/05/1989)



□ Organisation des phases : comparaison d'échelles de mesure et évolution temporelle

On exprime l'indice des vides en fonction de l'indice d'eau, obtenus à partir du suivi de mottes en dessiccation progressive (cf deuxième partie, chapitre IV.1.4.) et à partir de mesures au champ en suivi diachronique sur 6 mois (avril à septembre 1989 : fin de saison humide et saison sèche) sur le site expérimental de Trois Bassins - Cocâtre (profil O4 de la séquence ouest) (figure III.67.). Le profil suivi se situe sur une bande non labourée, cultivée en rotation bisannuelle haricot-maïs (semis au sillon).

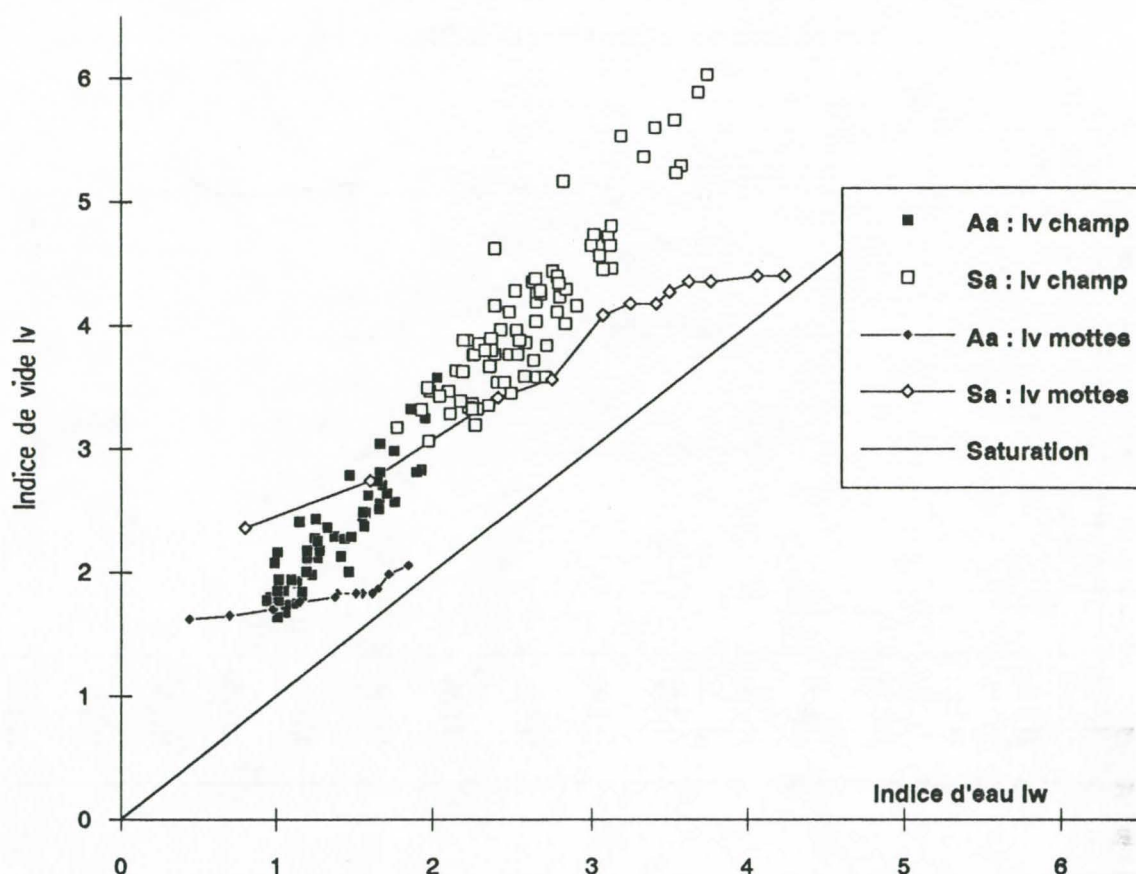
Le suivi relate donc simultanément une évolution selon un profil (profondeur z par pas de 5 cm) et dans le temps (mesures bimensuelles).

Ce mode de représentation est très proche de celui des physiciens du sol en matière de retrait : volume massique ($1/\gamma_d$) en fonction de la teneur en eau pondérale W .

On observe que :

- au champ, les horizons sont nettement discriminés, l'horizon Aa présente à la fois un système poral et des teneurs en eau moindres que l'horizon Sa,
- les couples $e - \theta$ obtenus au champ pour les deux horizons sont bornés en valeurs inférieures par les courbes de retrait $e = f(\theta)$ obtenues sur mottes centimétriques ; pour l'ensemble de la chronique de mesure, les indices d'eau restent élevés : supérieures à 1 pour Aa, à 2 pour Sa,
- pour les indices d'eau élevés, les couples obtenus au champ restent éloignés de la droite de saturation, alors que ceux obtenus sur mottes s'en rapproche.

Figure III.67. Expression de l'indice des vides en fonction de l'indice d'eau sur l'andosol O4, résultats obtenus sur mottes (laboratoire) et au champ (sonde gamma-neutronique) pour les horizons Aa (5 - 25 cm) et Sa (30 - 60 cm).



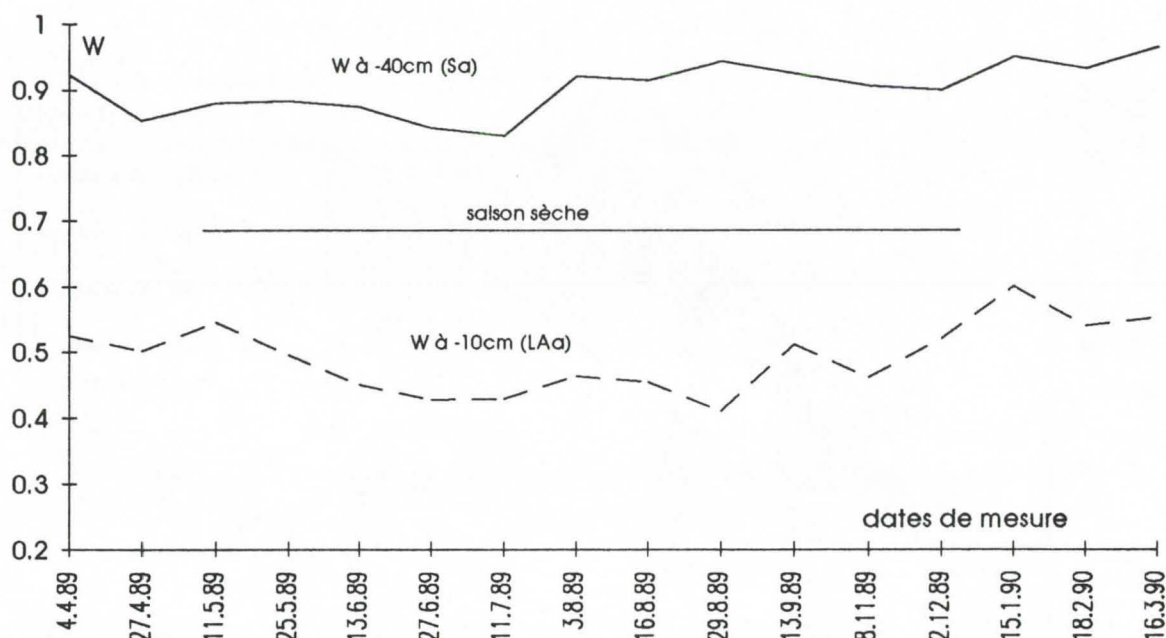
L'observation des données par pas de profondeur au sein d'un même horizon indique que les couples $e - \theta$ évoluent en fait peu, l'évolution de la répartition des phases dépend plus de la profondeur z que de la date de mesure, particulièrement pour l'horizon Sa.

Compte tenu de l'uniformité du matériau Sa constaté sur profil, ces résultats indiquent cependant que les horizons apparaissent déformables et que l'indice d'air reste constant pour toute la gamme de couples $e - \theta$ obtenus lors de variations bioclimatiques au champ (sur un profil), cela implique que les variations volumiques du système poral, dépendantes des teneurs en eau, ne concernent que les pores de petite taille, impliqués dans la rétention de l'eau. La macroporosité (pores d'origine biologique, mécanique), peu représentée dans ces substrats, serait inerte à l'échelle métrique. Cette porosité est réduite à l'échelle de mottes centimétriques, elle n'existe plus dans du matériau remanié et dispersé (mortier); cela explique le comportement en dessiccation des couples $e - \theta$ obtenus sur mottes et sur mortier (retrait) qui atteignent aisément la droite de saturation dès les teneurs en eau modérées (partie II, chapitre IV.2.1.).

La figure III.68. montre l'évolution temporelle de la teneur en eau pondérale, mesurée dans deux horizons d'un même profil d'andosol non perhydraté. On note que les variations dans l'horizon superficiel sont calquées sur le cycle climatique d'ensemble, plus faibles en saison sèche, plus fortes en

saison humide. Les variations dans l'horizon Sa sont moindres et surtout moins déterminées par le régime climatique.

Figure III.68. Evolution temporelle de la teneur en eau pondérale dans deux horizons d'un andosol non perhydraté (Trois Bassins, 1 000 m)



□ Incidences du travail du sol

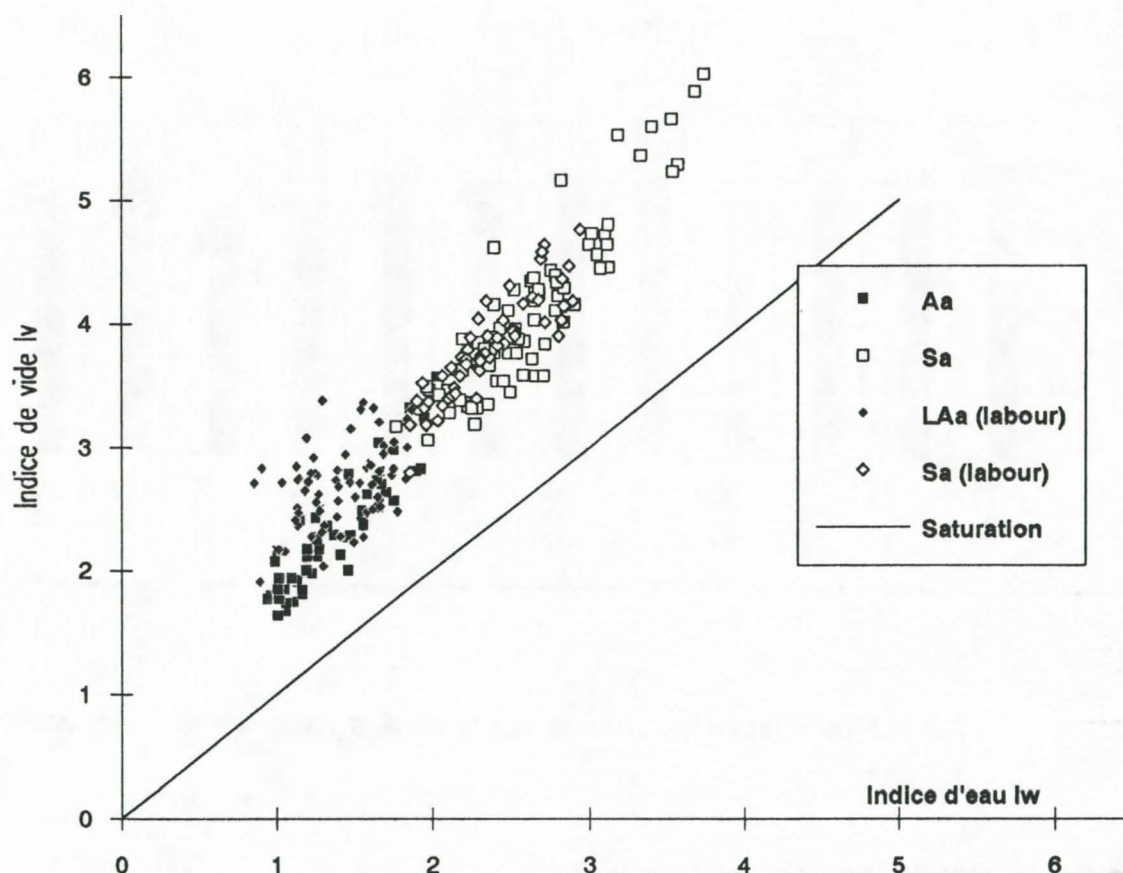
Sur le même site, on suit également l'évolution de la répartition des phases du sol sur un profil situé sur une bande cultivée labourée avant le semis de haricot (mars). Les deux parcelles (bandes contigües) sont conduites par ailleurs de façon identique (cf chapitre II.2.3., concernant l'état structural). Ces itinéraires sont installés depuis 1986 (3 cycles de haricot + 3 cycles de maïs).

La figure III.69. représente les couples $e - \theta$ obtenus selon les deux itinéraires. On observe que :

- le comportement des horizons Sa, non touchés directement par l'action des outils, est identique ; on note cependant que les valeurs restent plus faibles dans le cas de l'itinéraire avec labour,
- les horizons LAa présentent des valeurs d'indice de vide plus dispersées et plus fortes que les horizons Aa, ceci étant lié à l'ameublissement par les outils ; les teneurs en eau restent identiques.

En terme de stock d'eau (teneur en eau volumique θ par tranche de substrat), cela se traduit par une diminution d'eau disponible pour le peuplement de haricot en place. Lors du suivi, on constate que cette diminution de stock, calculé entre 5 et 20 cm de profondeur, est durable pour l'ensemble du cycle (figure III.70.). On note en outre que les quelques pluies orageuses enregistrées en saison sèche semblent mieux valorisées dans l'horizon non travaillé, accentuant encore la différence.

Figure III.69. Expression de l'indice des vides en fonction de l'indice d'eau sur l'andosol O4, résultats obtenus au champ (sonde gamma-neutronique) sur bande labourée (LAa : 5 - 30 cm ; Sa : 40 - 60cm), et sur bande non labourée (Aa : 5 -25 cm ; Sa : 30 - 60cm).

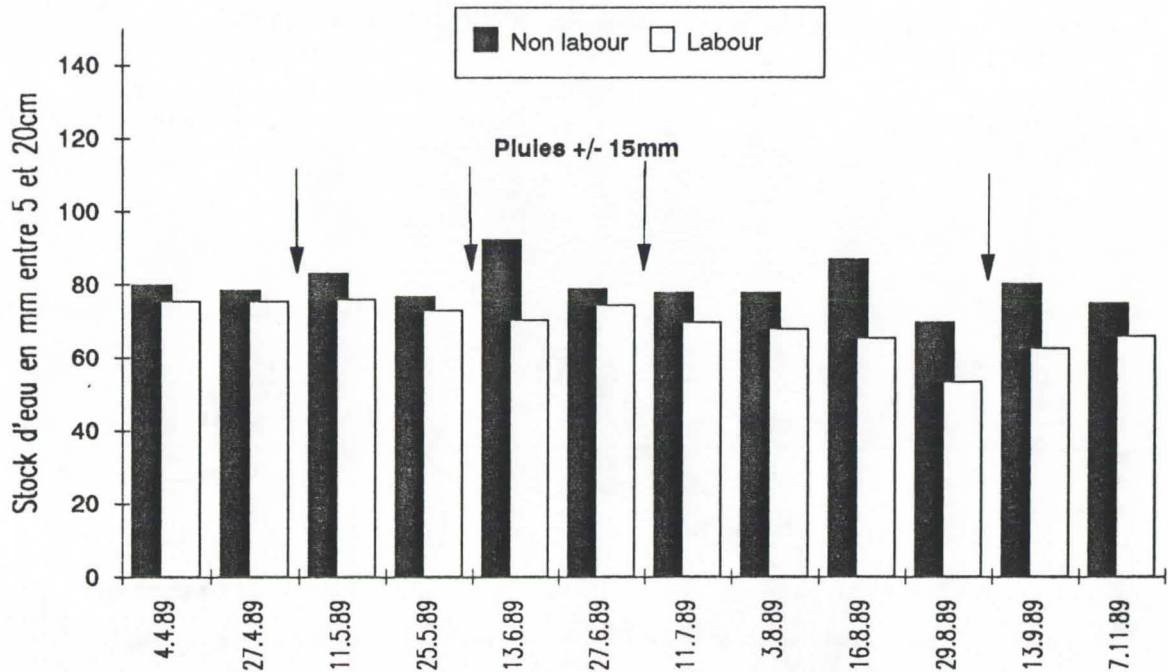


Concernant le cycle de maïs, un suivi sur le 2^{ème} cycle 1988 sur les mêmes parcelles à Trois-Bassins montre que la différence de stock occasionnée par le labour de 1^{er} cycle perdure sur le début du 2^{ème}, jusqu'aux premières fortes précipitations de janvier (PERRET, 1988).

La diminution du stock d'eau dans l'horizon cultural d'andosol non dégradé est confirmé par des suivis simultanés effectués sur le site de Fond Jardin sur andosol non dégradé labouré ou non.

Dans le cas d'andosols dégradés (Sa affleurant, parcelles sur le site de Fond Jardin), le processus semble inverse, une diminution des stocks après labour est enregistrée dans les premières semaines (stade levée) puis la différence s'estompe et s'inverse en fin de saison sèche.

Figure III.70. Evolution des stocks d'eau entre 5 et 20cm sur andosol non dégradé, labouré ou non, au cours de la saison sèche 1989 (cycle de haricot).



1.3.2. Evolutions et structures spatiales des paramètres de répartition des phases

□ Le dispositif expérimental de Fond Jardin

Sur le site expérimental de Fond Jardin (1 000 m, andosols non perhydratés), un dispositif de prélèvement selon un maillage régulier chevauchant deux itinéraires techniques est mis en place. Ce dispositif a été décrit dans un chapitre précédent (II.2.3.). Ces itinéraires de productions vivrières (rotation haricot / maïs en deux cycles par an) diffèrent uniquement par l'opération de préparation du sol intervenant avant semis du haricot de premier cycle, en mars : labour à la charrue à soc et sillonnage ou sillonnage seul. Leur mise en place a été réalisée début 1989.

3 campagnes de prélèvements au cylindre sur 80 points et selon 2 profondeurs (10 - 15 cm et 30 - 35 cm) ont permis la mesure de la masse volumique apparente sèche γ_d et de la teneur en eau pondérale W dans l'horizon cultural. De nombreux autres paramètres ont également été étudiés (composantes de la structure -cf chapitre II.2.3.- ; physico-chimie...). L'ensemble du dispositif permet de mettre en relation les différents paramètres entre eux, d'étudier leur variabilité à l'échelle parcellaire, d'évaluer l'incidence des itinéraires de préparation de sol.

On note que la parcelle, jugée représentative du contexte générale de la zone d'altitude sur andosols non perhydratés, présente des zones érodées où affleure le matériau d'altération S_a sous une forme particulière fortement desséchée d'épaisseur variable n'excédant pas quelques cm, et recouvrant une forme massive très hydratée. Pour le reste de la parcelle, l'horizon superficiel A_a s'est maintenu sur quelques cm jusqu'à 20 - 30 cm, recouvrant l'horizon S_a massif.

Figure III.71. Paramètres statistiques sur le maillage de prélèvement, site de Fond Jardin (andosol non perhydraté, 1000m)

Date : août 1989

	HV 10-15cm			HV 30-35cm			DS 10-15cm		DS 30-35cm	
	moyenne	variance		moyenne	variance		moyenne	variance	moyenne	variance
	0.396	0.0067		0.484	0.0069		0.588	0.014	0.508	0.013
	0.356	0.0033		0.447	0.0051		0.57	0.01	0.55	0.0087
Parcelle entière	0.435	0.007		0.522	0.0058		0.606	0.016	0.465	0.013
Zone labourée										
Zone non labourée										

Date : mars 1990 avant labour

	HV 10-15cm			HV 30-35cm			DS 10-15cm		DS 30-35cm	
	moyenne	variance		moyenne	variance		moyenne	variance	moyenne	variance
	0.485	0.0041		0.576	0.0063		0.677	0.0096	0.552	0.015
	0.47	0.0028		0.545	0.0051		0.669	0.0054	0.588	0.011
Parcelle entière	0.5	0.0049		0.607	0.0055		0.685	0.014	0.516	0.016
Zone labourée										
Zone non labourée										

Date : mars 1990 après labour

	HV 10-15cm		DS 10-15cm	
	moyenne	variance	moyenne	variance
Zone labourée	0.413	0.0029	0.66	0.0056

Les 3 dates de mesure sont août 1989, mars 1990 avant labour, mars 1990 après labour.

□ Distributions et paramètres statistiques

La distribution des valeurs obtenues réparties en classes sont pour la masse volumique sèche γ_d de type grossièrement normale pour l'ensemble de la population étudiée et pour les deux profondeurs. Pour la teneur en eau volumique θ , on observe une répartition plus complexe où l'on peut distinguer deux modes : une répartition de type normale aplatie pour les valeurs faibles (correspondant à l'horizon Aa et Sa dégradé), une répartition de type normale pour les valeurs plus fortes (horizon Sa).

Les paramètres statistiques valides pour des distributions assimilables à des lois normales sont calculés pour ces deux variables : moyenne et variance. La figure III.71. en relate les valeurs aux différentes dates, pour les 2 profondeurs et sur les différentes zones ($DS=\gamma_d$, $HV=\theta$). Ces résultats appellent les commentaires suivants :

SELON LA PROFONDEUR DE MESURE :

- les teneurs en eau sont toujours supérieures à 30 - 35 cm qu'à 10 - 15 cm, les masses volumiques toujours inférieures,
- cette tendance est moins marquée sur la zone labourée, particulièrement pour la masse volumique,

SELON L'ITINERAIRE :

- les teneurs en eau sont inférieures et de moindre variabilité sur la zone labourée,
- les masses volumiques sont moins variables sous labour,

SELON LA DATE DE MESURE :

- les teneurs en eau sont partout supérieures à la fin de la saison des pluies (mars 1990) par rapport au milieu de saison sèche (août 1989), on remarquera cependant qu'une cartographie des variations de teneur en eau entre ces deux dates à 10-15 cm, indique que $\Delta\theta$ est élevé lorsque le matériau Aa affleure, très faible dans le matériau Sa affleurant (cf annexes) ; l'humidité diminue après labour à 10 - 15 cm.
- une augmentation sensible de la masse volumique est mesurée partout, sauf juste après labour (mars 1990) dans la zone superficielle,
- dans la zone superficielle (10 - 15 cm), il y a homogénéisation des valeurs de masse volumique et de teneur en eau.

De façon synthétique, on peut dire que la teneur en eau volumique θ et la masse volumique sèche γ_d dépendent, à l'échelle parcellaire, à la fois des contraintes bioclimatiques (alternance de périodes sèches et humides), du type de matériau composant l'horizon cultural (Aa, Sa, LAa ou mélange LAa/LSa) et de l'itinéraire de préparation de sol pratiqué.

On remarque que la masse volumique sèche dans l'horizon cultural augmente, y compris dans le matériau situé à 30 - 35 cm et non remanié, la parcelle est de mise en culture récente (début 1989) après défriche, on peut supposer que le matériau subit progressivement une évolution de son architecture, liée à cette mise en culture, cette évolution est accélérée par les façons culturales (mélange des horizons Aa et Sa, dessiccations plus poussées).

Figure III.71. Semi-variogrammes normés du paramètre θ , mesuré sur 80 points à 30-35 cm (août 1989).

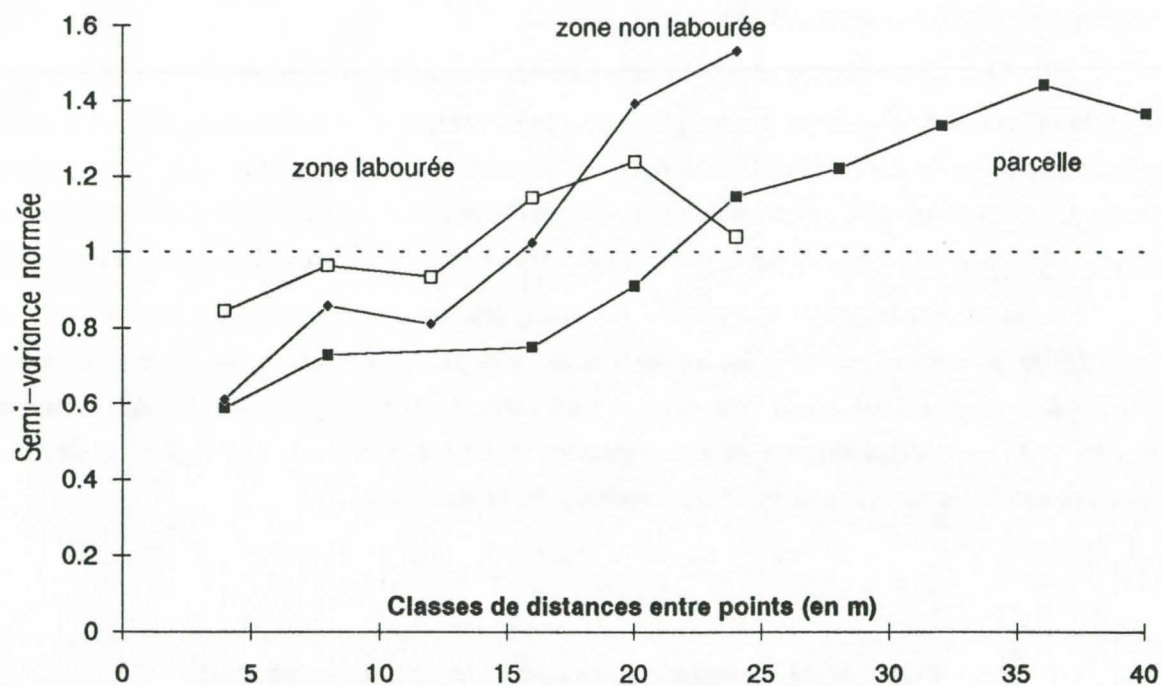
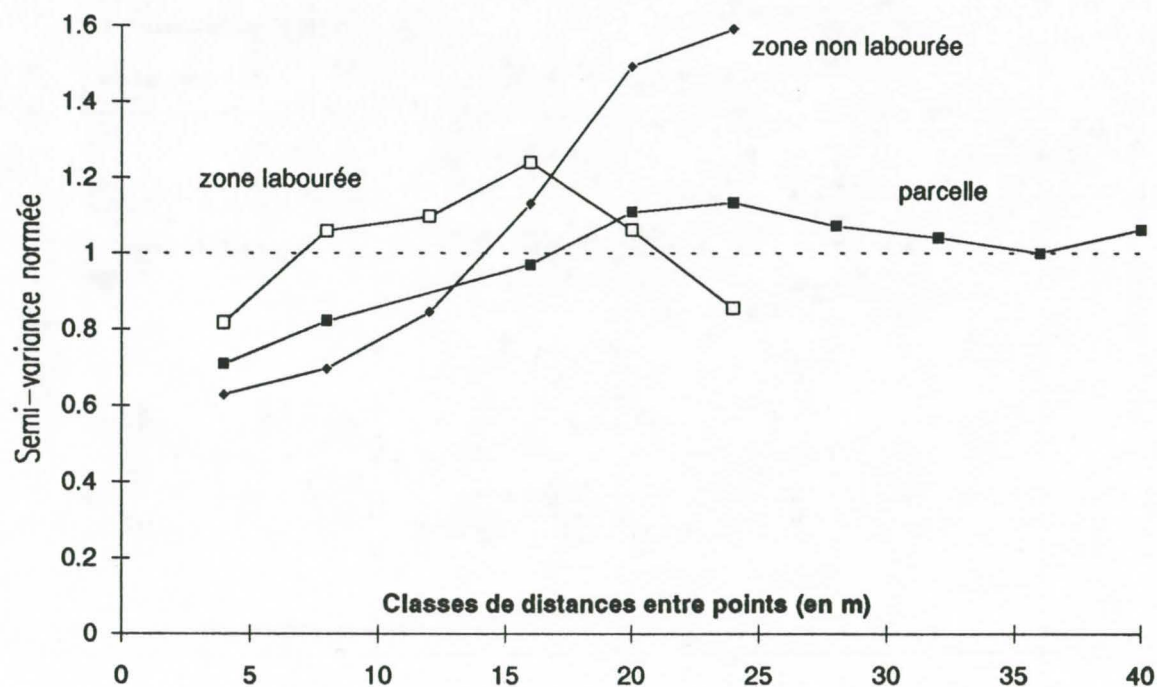


Figure III.72. Semi-variogrammes normés du paramètre γ_d , mesuré sur 80 points à 10-15 cm (mars 1990).



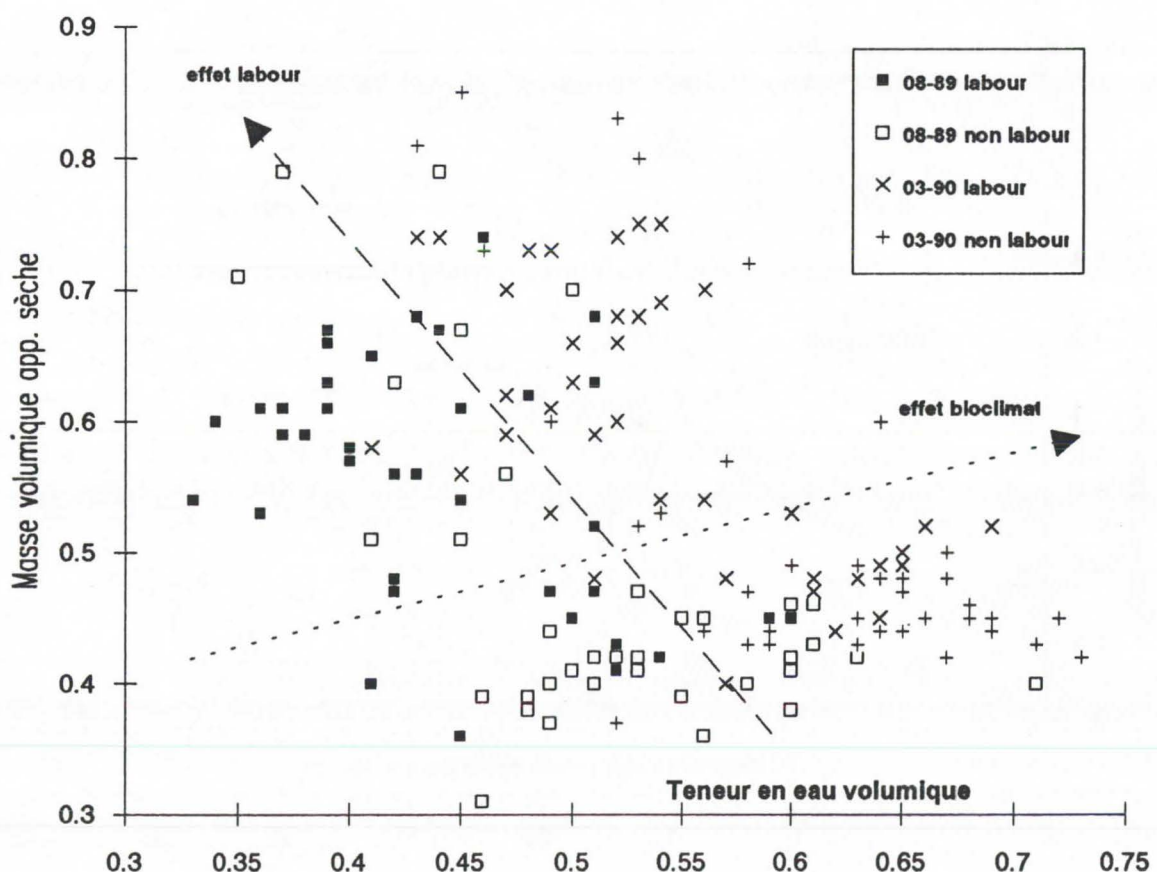
□ Structures de variabilité

La variographie, déjà utilisée pour caractériser la variabilité des paramètres de structure du sol sur le même dispositif (chapitre II.2.3.) est mise en oeuvre.

Pour les paramètres θ et γ_d , les résultats fournis par cette approche sont toujours de même nature : si la variabilité à l'échelle de la parcelle entière présente une structure diverse, à l'échelle de la zone labourée, les semi-variances calculées par distance entre couples sont très proche de la semi-variance de la population. En d'autres termes, le labour homogénéise et randomise (indépendance entre points) les valeurs de teneur en eau et de masse volumique, seuls les mesures très proches apparaissent interdépendantes.

A l'échelle de la zone non labourée, les variogrammes sont non bornés. Soit on se situe dans le cas d'une dérive, soit le variogramme est borné mais l'échelle d'étude ne permet pas de mettre en évidence de palier, soit la variance est infinie et son estimation dépend donc de l'échelle d'étude. En tout état de cause, des facteurs pédogénétiques et bioclimatiques doivent prédominer. Les figures III.71. et III.72. relatent deux exemples de variogrammes représentatifs de ce comportement.

Figure III.73. Expression graphique de la masse volumique γ_d en fonction de la teneur en eau θ à 30 - 35 cm de profondeur, à deux dates et selon deux itinéraires.



□ Relations entre variables

A l'échelle du profil pédologique et particulièrement dans les horizons profonds des sols andiques, les relations teneur en eau - masse volumique ont été étudiées (ROSELLO, 1984; VAKSMAN, 1987), mettant en évidence une corrélation grossièrement affine et de pente négative entre γ_d et θ . A l'échelle d'une parcelle cultivée, les relations apparaissent plus complexes.

Les deux paramètres sont mis en relation graphique (figure III.73.), les données sont issues de mesures à 30 - 35 cm, à deux dates et selon les deux itinéraires.

Si l'ensemble des couples forment un nuage disparate, les modalités "date de mesure" et "itinéraire" discriminent 4 groupes. On peut ainsi cerner les déterminismes d'évolution de ces paramètres dans l'horizon cultural (30 - 35 cm) d'une parcelle récemment mise en culture :

- le labour occasionne à la fois une diminution de la teneur en eau volumique et une augmentation de la masse volumique sèche. Ce deuxième point peut paraître paradoxal mais s'explique par le mélange de l'horizon superficiel Aa ou Sa sec avec du matériau profond Sa finement poreux de très faible masse volumique apparente sèche qui constitue le matériau originel vers 30 - 35 cm.

- le bioclimat intervient de deux façons : au rythme des cycles pluviométriques au plan hydrique (augmentation du stock en saison humide) et à une échelle plus progressive par une modification de l'architecture porale du matériau soumis à des contraintes plus importantes à partir de la mise en culture.

1.4. Travail du sol et hydrodynamique : conductivités hydrauliques des horizons culturaux

1.4.1. *Rappels*

L'infiltromètre à succion contrôlée, décrit en partie II (chapitre IV.1.2.) permet d'accéder aux valeurs de conductivité hydraulique à différents états énergétiques de l'eau. Avant de présenter les résultats obtenus sur différents essais, quelques principes théoriques sont rappelés, certaines lois et les paramètres en jeu ont été présentés dans la seconde partie (chapitre IV.1.1.).

□ Généralités

La circulation de l'eau dans le sol se fait sous l'action du gradient de charge hydraulique H ; qui exprime l'énergie potentielle totale par unité de poids, et agissant donc comme une force motrice :

$$H = h - z \quad \text{avec :}$$

$h = \psi_p$ = succion capillaire (négative en sol non saturé, nulle à saturation) ;

$z = \psi_g$ = énergie potentielle de position, négative lorsque l'axe des profondeurs Z est orienté vers le bas ;

H est donc une valeur négative.

L'eau s'écoule de zones du sol de charge élevée vers des zones de charge faible. Dans le cas d'un écoulement vertical en milieu saturé, le flux q est proportionnel au gradient de potentiel dH/dz ou gradient hydraulique $\text{grad } H$ (loi de Darcy) :

$$q = -K_s (dH/dz)$$

où K_s (conductivité hydraulique à saturation) est une constante qui dépend principalement de la géométrie du système poral du milieu.

En milieu non saturé, c'est l'état hydrique et le potentiel matriciel (suction) qui deviennent déterminants : la circulation de l'eau devient plus complexe (géométrie des pores modifiées par la présence d'air) et la conductivité hydraulique décroît quand la suction augmente. Pour un écoulement monodirectionnel vertical, la loi de Darcy généralisée s'exprime :

$$q = -K(h) (dh/dz)$$

La conductivité hydraulique K est une fonction de la suction. Exprimée en fonction de la teneur en eau θ du sol, on a (LUC, 1978) :

$$q = -K(\theta) (dh/dz)$$

□ L'infiltrométrie à suction contrôlée : principes de calcul de $K(h)$

Différentes méthodes expérimentales permettent d'obtenir les valeurs de conductivité (VAKSMANN, 1987). L'infiltromètre à suction contrôlée est facile à utiliser, peu consommateur d'eau (dans un contexte expérimental parfois enclavé et difficile d'accès), il permet en outre de nombreuses répétitions et la caractérisation précise des différents types d'horizons constituant le profil cultural. L'infiltromètre mis en oeuvre donne accès aux valeurs de conductivité hydraulique $K(h)$ à différents potentiels de l'eau, depuis la saturation ($K(0) = K_s$) jusqu'à un potentiel équivalent à une hauteur d'eau de 200 mm.

WOODING (1968) montre que le processus d'infiltration tend vers un régime permanent à flux constant q_0 tel que :

$$q_0 = k(h) + (4 \phi / \pi r) \quad \text{avec :}$$

r = rayon de l'embase

ϕ = potentiel de Kirchoff (RATTS, 1971), dépendant lui même de $K(h)$ et de l'évolution de l'état hydrique du milieu sous infiltration.

La détermination expérimentale de $q_{0(1)}$ et $q_{0(2)}$ à partir de deux diamètres d'embase r_1 et r_2 fournit deux équations de Wooding à deux inconnues $K(h)$ et ϕ . La détermination de $K(h)$ est :

$$K(h) = [(q_{0(1)} r_1) - (q_{0(2)} r_2)] / (r_1 - r_2)$$

L'infiltrométrie à suction contrôlée permet d'accéder à d'autres caractéristiques hydrodynamiques très intéressantes (sorpitivité, temps de submersion, temps gravitaire / capillaire...). Leur calcul nécessite la mesure gravimétrique de θ avant et après infiltration ainsi que la maîtrise parfaite des flux en début d'infiltration (WEYLAND, 1990 ; BOURON, 1990 ; GOUBAND, 1992).

Il faut rappeler enfin que cette méthode expérimentale nécessite de nombreuses répétitions (5 à 6 infiltrations par diamètre d'embase et par suction dans le cadre de nos essais) représentant un espace de mesure important. On constate une faible variabilité des mesures de flux pour les suctions élevées (à partir de $h = 30$), et pour toutes les suctions dans le cas du matériau Sa profond en place, très homogène. Pour les autres matériaux plus hétérogènes et pour l'embase S1 ($r = 125$ mm), le coefficient de variation moyen obtenu sur l'ensemble des répétitions à $h = 0$ mm est de l'ordre de 10%.

1.4.2. Conductivités hydrauliques des horizons et travail du sol

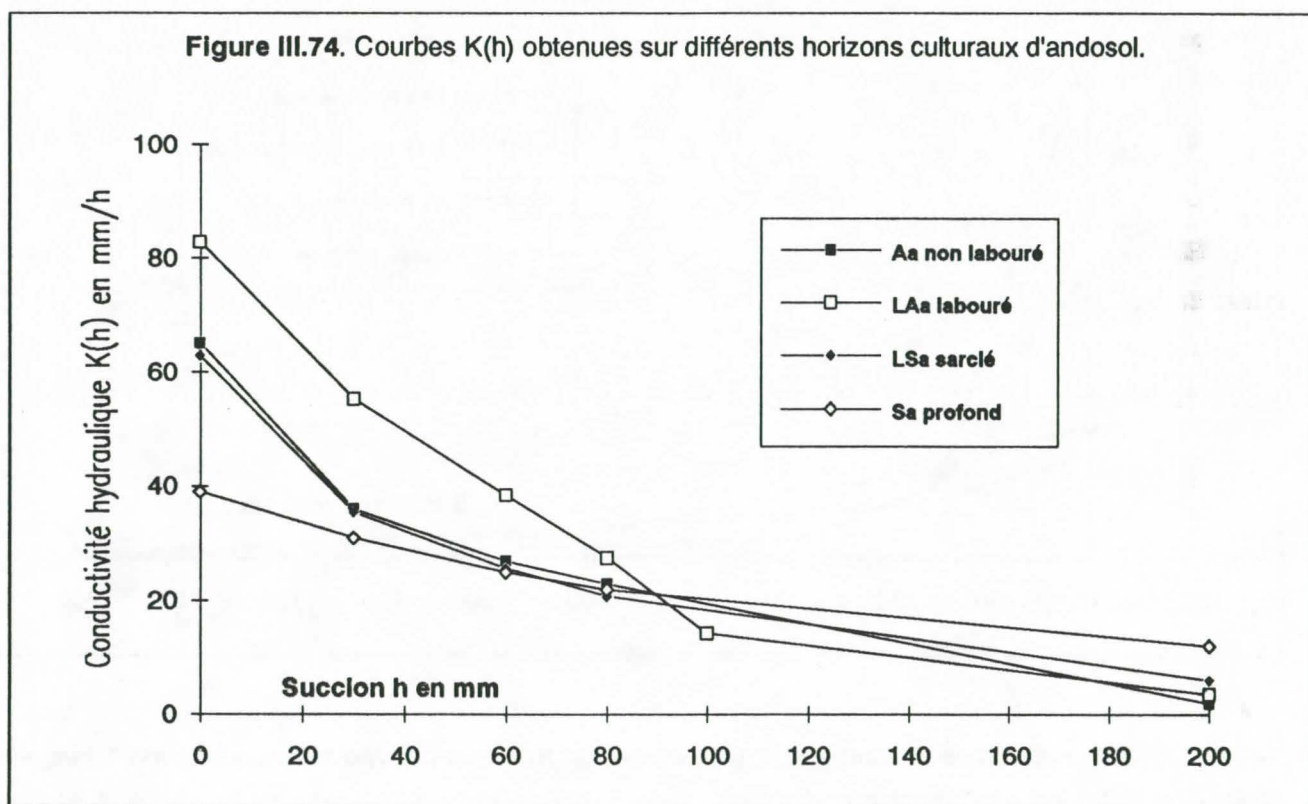
Sur différents sites expérimentaux, des mesures de conductivités hydrauliques $K(h)$ par infiltrométrie ont été effectuées, à des suctions de 0 (saturation), 30, 60 et 200mm; parfois 10, 80 ou 100mm ; les courbes conductivité hydraulique $K(h)$ en fonction de la suction h illustrent l'état et l'évolution de l'espace poral dans les différents horizons. Il semblait intéressant de caractériser chacun d'entre eux, et d'étudier l'impact du travail du sol.

La valeur de $K(0)$ obtenue dans la zone superficielle est importante car elle illustre la capacité du matériau à laisser infiltrer l'eau de charge nulle, c'est le cas d'une lame d'eau de faible épaisseur ruisselante sous pluie.

□ Les différents horizons

Sur les sites de Cocâtre et de Fond Jardin, $K(h)$ est mesuré sur différents types d'horizon superficiel et sur l'horizon sous jacent Sa (figure III.74.).

On observe les faibles valeurs d'ensemble de $K(0)$, qui classent ces sols parmi les matériaux moyennement filtrant à filtrant selon la norme GEPPA (1981). Les valeurs $K(h)$ traduisent le comportement à l'écoulement des différents systèmes poreux déjà décrits :



La courbe obtenue sur l'horizon Sa profond illustre la prédominance d'une porosité très fine et continue qui limite fortement la conductivité à saturation mais permet une conductivité non négligeable à des suctions élevées; ce comportement particulier est déterminant :

- d'une part sous forte pluie puisqu'en fonction de sa position dans le profil cultural, cet horizon va gouverner la capacité d'infiltration du sol (voir chapitre II.4.) ;

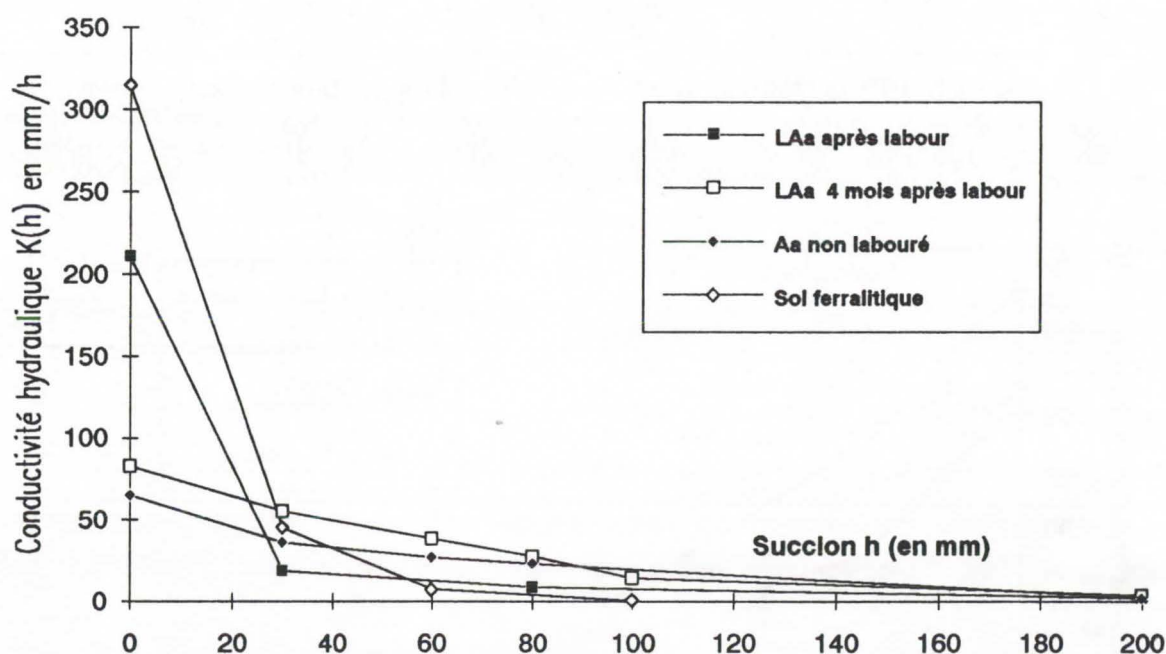
- d'autre part concernant l'alimentation en eau des horizons culturaux par les couches profondes très hydratées, ce fonctionnement mesuré de l'horizon Sa peut confirmer l'hypothèse de remontées capillaires très importantes en saison sèche (VAKSMANN, 1987).

Ce matériau soumis à l'affleurement en sol tronqué par l'érosion et sarclé (LSa) voit son comportement se modifier, et devenir très proche de celui d'horizon Aa.

□ Incidence du travail du sol

Un horizon LAa travaillé 4 mois auparavant (charrue à socs, mars 1989) présente des conductivités un peu supérieures au matériau Aa non remanié pour les faibles suctions. La même mesure effectuée juste après labour (figure III.75.) montrait une valeur de $K(0)$ très forte, liée à une augmentation de la macroporosité sous l'action des outils, la fragmentation des structures construites occasionnant une diminution relative du pool capillaire, qui se traduit par des valeurs plus faibles de $K(h)$ à des suctions plus fortes. On note que ce comportement est très momentané puisque 4 mois seulement après le labour, le matériau retrouve un fonctionnement quasi originel (retassement du profil).

Figure III.75. Courbes $K(h)$ obtenues sur différents horizons culturaux d'andosol et sur un sol ferralitique.



On notera que la courbe $K(h)$ obtenue sur un matériau de type ferralitique (Bassin Plat, sud, 150m d'altitude) est très différentes : $K(0)$ très élevé (> 300 mm/h) , $K(h)$ devenant très faible à partir de suctions supérieures à 60 mm.

Sur andosols perhydratés dégradés (Piton Hyacinthe), $K(0)$ a été déterminé avant (friche herbacée) et après passage des différents outils de préparation de sol (voir chapitre III.1.2.). La valeur initiale de $K(0)$ mesurée dans la couche superficielle était de 56 mm/h (moyenne de 6 mesures en différents points de la parcelle). Après passage des outils, les valeurs de $K(0)$ obtenues sont les suivantes : 122.5 mm/h après cultivateur rotatif, 131.7 mm/h après charrue à socs, 153 mm/h après machine à bêcher

(seule cette dernière moyenne est significativement différente des autres au seuil 5%). Après 1 mois, ces valeurs tombent respectivement à 87, 73 et 91 mm/h (non significativement différentes au seuil 5%).

1.5. Conclusions : travail du sol et fonctionnement de l'horizon cultural

1.5.1. Travail du sol, profils culturaux et fonctionnements du sol

La préparation mécanisée des andosols se caractérise par :

- une profondeur de travail non limitée par une résistance du matériau (cohésion faible, pierrosité nulle...) ;
- le mélange de couches de structures diverses, le travail profond touchant le matériau d'altération Sa massif, qui est remonté en blocs par la charrue à soc ;
- un émiettement toujours important, directement mécanique par l'action directe des outils, à terme bioclimatique par dessèchement des mottes de matériau remonté dans la couche superficielle ;
- l'adhérence importante aux pièces travaillantes de type versoirs et socs de charrue, occasionnant un état de surface accidenté ;
- une reprise en masse progressive du matériau humide Sa dans les couches travaillées au delà de 15 cm, révélée par des profils culturaux successifs après travail et par l'évolution des fonctionnements hydrodynamiques.

Au plan des caractéristiques du sol, le gain de porosité totale occasionné par le travail du sol est limité et traduit par un faible foisonnement. L'infiltrométrie à succion contrôlée montre qu'il concerne essentiellement la porosité de rétention de l'eau, de diamètre compris entre 0.19 μm et 150 μm . On note que le labour et le cultivateur rotatif diminuent la macroporosité (d'origine biologique dans le sol sous friche), dans le premier cas certainement par un double effet émiettement / remontée de matériau massif microporeux (associée peut être à une compression des pores les plus gros > 150 μm), dans le second cas par pulvérisation des structures.

1.5.2. Travail du sol et variables d'état : évolution spatiale et temporelle

Mesurée *in situ* et conformément aux mesures effectuées sur échantillons en laboratoire, la répartition des phases du sol est très différente entre horizon Sa profond et horizons superficiels. Le volume poral toujours très important dans l'horizon Sa n'est que partiellement rempli d'eau, malgré les fortes teneurs en eau et l'impression tactile et visuelle de forte hydratation.

Les mesures à l'échelle métrique (sonde nucléaire) font apparaître les variations concomitantes de teneur en eau et de porosité, ces processus concernant la porosité la plus fine. Elles mettent en évidence une porosité plus grossière et inerte aux variations bioclimatiques.

Les variations de teneur en eau et de porosité (traduite par la masse volumique sèche ou l'indice des vides) sont très dépendantes du type d'horizon et de la position relative de la mesure dans le profil, que d'effets climatiques saisonniers (sauf pour la couche superficielle).

Le travail du sol induit une augmentation du volume poral, cela se traduit par une diminution du stock d'eau volumique total.

S'agissant de l'effet du labour, l'étude de la structure de variabilité des variables d'état teneur en eau volumique θ et masse volumique sèche δ_d , indique une homogénéisation. Alors qu'en sol non travaillé, la variabilité spatiale de ces paramètres semble lié à des facteurs pédogénétiques.

1.5.3. Synthèse : le problème du travail du sol dans les agrosystèmes vivriers sur andosols.

Synthétiquement, le travail mécanisé des andosols entraînent des modifications de deux ordres : ameublissement / émiettement et homogénéisation.

□ Ameublissement, comportement du sol vis-à-vis de l'eau.

Compte tenu de l'espace poral très important du matériau andique, l'évolution de la porosité totale n (ou de la masse volumique apparente γ_d) dans le profil cultural n'est pas très importante sous travail du sol, d'autant que celui-ci mélange du matériau superficiel macroporeux avec du matériau profond S_a à forte microporosité, une mesure globale de γ_d n'est pas très pertinente.

Le passage des outils provoque plutôt l'émiettement des structures construites, généralement fragiles dans l'horizon cultural. Les mesures d'état de surface font d'ailleurs apparaître un foisonnement faible occasionné par les machines, alors que l'effet desséchant du travail des outils et l'aspect particulière des horizons remaniés confèrent une impression visuelle de foisonnement très important.

La diminution des teneurs en eau volumique des horizons travaillés est montrée, elle est durable et importante dans le matériau A_a déstructuré par les outils. Associée à une discontinuité capillaire créée sur le fond de travail, elle semble être à l'origine des baisses de rendements enregistrées sous travail du sol dans ce type de matériau et pour différentes spéculations (haricot, maïs, pomme de terre en particulier). Cette hypothèse semble confirmée :

- puisque, lorsque l'on étudie les composantes du rendement de ces cultures en rapport avec l'alimentation hydrique, on montre que l'impact de l'itinéraire de préparation de sol est toujours modulé par les conditions pluviométriques du cycle concerné (PIROT et MICHELLON, 1986 ; 1987),
- puisque l'on observe un effet pénalisant du labour de 1^{er} cycle également sur les rendements de la culture de 2^{ème} cycle (souvent du maïs) : l'écart hydrique entre profil labouré et profil non labouré persiste pendant toute la saison sèche, soit parfois jusqu'au milieu du 2^{ème} cycle (décembre) (PERRET, 1988),
- puisque l'effet d'un labour de 2^{ème} cycle (réalisé en octobre, en pleine saison sèche) est généralement désastreux pour les rendements.

Ces résultats concernant les effets destructurants et desséchants du travail du sol traditionnel confirment ceux d'études effectuées au Japon sur matériau andique perhydraté (labour profond comparé à des techniques de travail minimum -5 cm- au cultivateur à dents ou cultivateur rotatif) (OGAWA et al., 1988).

En accord avec l'évolution des systèmes de porosité, la conductivité hydraulique à saturation, et pour les faibles valeurs de succion, est nettement augmentée juste après travail, au détriment de la conductivité à des succions plus fortes, particulièrement dans le matériau A_a . Cet effet ne semble pas persister au delà d'un cycle de culture.

La mise en cause du travail du sol comme facteur favorisant l'érosion hydrique est donc à moduler (BOUGERE, 1988) : la capacité d'infiltration intrinsèque améliorée et le microrelief généré sont

plutôt des éléments aptes à limiter le ruissellement. C'est plutôt la déstructuration des horizons superficiels qui est en cause, le dessèchement et l'émiettement des structures construites les rendent plus facilement mobilisables par les eaux de ruissellement concentrées en rigoles.

□ Homogénéisation du profil, implications agronomiques.

Le travail du sol est un facteur d'homogénéisation durable des paramètres physiques caractérisant l'environnement racinaire des cultures, au plan de l'horizon cultural et au plan spatial à l'échelle parcellaire. Cet effet d'homogénéisation a déjà été montré sur l'organisation de la phase solide (agrégation, chapitre II.2.3.).

Cela se traduit par un peuplement et des rendements généralement plus homogènes.

Ce nivellement du comportement des plantes à l'échelle parcellaire est important, au delà du problème de niveau moyen de rendement obtenu, lorsque l'on procède à la motorisation des opérations de récolte (maïs -ensilage par exemple).

Dans la suite de l'étude, il apparaissait intéressant d'observer et de quantifier, expérimentalement et à l'échelle parcellaire, le comportement agronomique de peuplements végétaux cultivés mis en relation avec les paramètres physiques et chimiques du substrat andique, l'itinéraire technique pratiqué et le type d'horizon affleurant.

Puis, selon une approche similaire concentrée sur les opérations de travail du sol, d'observer les interactions entre le fonctionnement des combinaisons cellule motrice - outil et le substrat de culture.

2. Aspects agronomiques, étude des relations plante - milieu andique - opérations de préparation des sols

2.1. Travail du sol et comportement racinaire

2.1.1. Généralités

Les caractéristiques très différentes entre horizon superficiel et horizon sous jacent témoignent d'un environnement nettement bimodal qui influence le comportement racinaire des cultures. L'interface entre ces deux environnements est le plus souvent bien marqué.

Les observations qualitatives qui ont pu être faites concernant le comportement racinaire des peuplements végétaux cultivés sur sols andiques sont les suivantes :

- l'interface horizon superficiel agrégé travaillé ou non / horizon Sa sous jacent ne constitue une barrière à la progression des racines (résistance mécanique à la pénétration) que dans quelques conditions bien précises et souvent transitoires au cours du cycle cultural, et lorsque de toute façon la plante semble trouver dans l'horizon superficiel un environnement favorable : cultures à enracinement fasciculé de faible développement (haricot...) sur l'ensemble du cycle, jeunes plants de géranium et graminées (maïs, canne à sucre, graminées prairiales...) en début de croissance...,

- dans l'ensemble des autres conditions de substrat (y compris lorsque l'horizon Sa massif est presque directement affleurant...), et pour l'ensemble des plantes cultivées à pivot (crucifères, tabac...) ou à enracinement agressif (graminées, géranium...), cet interface est franchi ; on observe cependant dans l'horizon sous jacent Sa une densité racinaire moindre, des pivots moins volumineux, des racines moins ramifiées et plus traçantes,

- l'impact du travail du sol sur l'enracinement dépend principalement de son action de rupture de cet interface : sous maïs ou sous graminée prairiale, le travail du sol modifie très peu le profil racinaire lorsque l'horizon Aa agrégé et humifère excède 30 cm de profondeur. Lorsque cet horizon est moins développé ou que l'horizon Sa affleure, on observe un développement des systèmes racinaires plus importants sous labour que sous travail superficiel (PERRET, 1988 ; PAILLAT et PERRET, 1988),

- le travail du sol est généralement mieux valorisé en terme d'enracinement sous plantes à enracinement pivotant (crucifères et tabac) ou profond (maïs).

2.1.2. Cas particuliers

L'enracinement du haricot semble optimal lorsque l'horizon structuré Aa est maintenu. Il est étroitement lié à l'itinéraire technique lorsque l'horizon Sa affleure (MICHELLON, GARIN, 1985). Ainsi sur sol érodé, l'implantation manuelle et traditionnelle au poquet dans un trou où la fumure organique est localisée, conduit à une concentration racinaire dans cet environnement. Ni l'horizon superficiel pulvérulent sarclé, ni le matériau continu environnant ne sont colonisés. Le comportement de jeunes boutures de géranium plantées au trou est identique.

Dans un itinéraire incluant un semis au sillon, les racines se développent dans ce sillon où la matière organique est localisée. Celle-ci semble jouer un rôle déterminant dans le développement racinaire et l'augmentation des rendements.

En itinéraire intensif avec labour et sillonnage mécanisés, les racines restent localisées dans les zones riches en matière organique, les mottes d'horizon Sa remontées dans l'horizon cultural ne sont pas colonisées.

Concernant le maïs, des comptages répétés sur grille (profil racinaire) révèlent que le système racinaire est globalement deux fois plus développé en quantité sous labour à la charrue à soc et sillonnage que sous sillonnage simple avant semis (BECLIN et *al.*, 1987 ; PERRET, 1988), cela peut expliquer la meilleure résistance à la verse des pieds sur parcelle labourée en conditions cycloniques (vents violents). Malgré ce développement racinaire supérieur et paradoxalement, les rendements enregistrés sous labour sont le plus souvent inférieurs à ceux obtenus sur semis au sillon simple.

2.2. Etablissement des rendements et paramètres édaphiques : présentation de la méthode

2.2.1. Généralités

Pour l'ensemble des cultures vivrières des systèmes à base de géranium des zones d'altitude sur andosol, on montre nettement l'incidence de la nature de l'horizon superficiel : les rendements sont toujours supérieurs lorsque l'horizon Aa s'est maintenu, ils sont moindres lorsque l'horizon Sa affleure. Dans le cadre des relations plante-milieu andique, c'est le paramètre principal déterminant l'établissement des rendements; et à l'échelle d'une parcelle, c'est le facteur principal de leur hétérogénéité (MICHELLON, GARIN, 1985). Cette répartition nettement inégale de la fertilité des horizons Aa et Sa affleurant se compose d'aspects physiques et mécaniques, et d'aspects chimiques.

Dans le cadre d'une expérimentation à l'échelle parcellaire, une étude méthodologique est conduite pour tenter d'analyser la part de ces différents aspects en prenant en compte l'incidence des itinéraires techniques. Sur le site de Fond Jardin, et sur deux cycles successifs (2^{ème} cycle 1989 de maïs ; 1^{er} cycle 1990 de haricot), des placettes de comptage sont disposées sur le maillage chevauchant les deux itinéraires techniques selon le dispositif déjà présenté. Ces placettes font l'objet du suivi des composantes du rendement depuis la levée jusqu'à la récolte, elles sont disposées régulièrement sur le maillage de mesure des données édaphiques. Elles sont au nombre de 10 par itinéraire (sous-parcelle) lors du cycle de maïs, de 14 lors du cycle de haricot.

Rappelons que l'ensemble de la parcelle se situe sur andosol non perhydraté désaturé chromique, très hétérogène puisque présentant à la fois des zones érodées où affleure l'horizon Sa et des zones où l'horizon Aa structuré s'est maintenu parfois sur plusieurs dizaines de centimètres.

2.2.2. Les données du milieu physique

□ Dispositif

Le dispositif de prélèvement, déjà présenté et utilisé par ailleurs (partie III, chapitres II.2.3. et III.1.3.) chevauche 2 itinéraires techniques différents uniquement par le mode de préparation du sol avant semis de 1^{er} cycle (haricot) : labour à la charrue à soc puis sillonnage ou sillonnage simple. Il s'étend sur un bloc de 28 m sur 36 m (soit deux sous-parcelles de 28 m sur 18 m), les prélèvements se font selon une maille élémentaire de 4 m sur 4 m. Il est utilisé à l'origine pour étudier les variabilités spatiales et temporelles de divers paramètres physiques et chimiques en fonction des itinéraires pratiqués, des campagnes de prélèvement ont eu lieu en août 1989, mars 1990 avant labour, mars 1990 après labour et novembre 1991.

Les paramètres mesurés à 10 - 15 cm et 30 - 35 cm de profondeur sont :

- au plan physique : la masse volumique apparente sèche γ_d et la teneur en eau volumique θ , la taille moyenne des agrégats MWD et l'indice de stabilité S,
- au plan chimique : les teneurs pondérales en azote total N (pour mille) et en carbone organique C (%), en potassium K, en calcium Ca, en magnésium Mg et la CEC (méq/100g), en phosphore assimilable P (ppm).

□ Interpolation

Il était nécessaire d'interpoler des valeurs de ces paramètres, à attribuer aux différentes placettes agronomiques, à partir des données du maillage. La technique d'interpolation choisie est le krigeage, méthode géostatistique issue des problèmes d'estimation minière (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978), de plus en plus utilisée en science du sol (BURGESS et WEBSTER, 1980 ; VAUCLIN, 1982 ; VOLTZ, 1986 ; WARRICK et al., 1986) et qui va permettre de déterminer en tout point de la parcelle et en particulier sur les placettes, la valeur des différents paramètres. D'autres méthodes d'interpolation sont envisageables, le krigeage (méthode probabiliste) présente l'avantage d'utiliser la structure spatiale des variables, il s'adapte donc bien aux phénomènes régionalisés, c'est une forme de moyenne locale pondérée par la nature de la dépendance spatiale entre données d'une variable.

La structure de variabilité spatiale des différents paramètres est établie par sous-parcelle et par variographie : on analyse la covariance entre points de mesure par pas de distance, le niveau d'autocorrélation entre points est établi (méthode présentée au chapitre II.2.3.).

L'estimation par krigeage présente trois caractéristiques :

- elle est linéaire, l'estimation de Z en x_0 est une combinaison linéaire des valeurs expérimentales z_i aux points x_i ,
- elle est non biaisée, c'est un choix selon lequel l'erreur moyenne doit être nulle,
- elle prend en compte une condition d'optimalité, minimisant la variance de l'écart entre Z et son estimation.

En outre, l'estimation de Z en tout point de mesure x_i est égale à z_i observé.

L'estimation de Z en un point x_0 est z_0 , somme linéaire ou moyenne pondérée des valeurs observées $z(x_i)$:

$$z_0 = \lambda_1 z(x_1) + \lambda_2 z(x_2) + \dots + \lambda_n z(x_n)$$

où les λ_i sont les poids associés aux données ponctuelles, qui prennent en compte les dépendances spatiales connues, exprimées dans le semi-variogramme, et les relations géométriques entre points observés. Leur somme est égale à 1. La méthode de calcul des λ_i est exposé dans l'ouvrage de JOURNEL et HUIJBREGTS (1978), et dans l'article de BURGESS et WEBSTER (1980).

La réalisation de cartes des isovaleurs de chaque paramètre est donc possible (logiciel SURFER 4, Golden Software, Inc., 1990), la valeur moyenne de ces variables par placette est estimée soit par krigeage ponctuel, c'est la moyenne des valeurs d'une vingtaine de point discrétisés, soit par krigeage de bloc, c'est la valeur calculée sur la surface couverte par la placette. Les deux méthodes fournissent des résultats très proches.

Cette méthode d'estimation *a priori* des paramètres édaphiques puis d'interpolation permet de :

- s'affranchir du dispositif de semis (place des rangs...), dont dépend le positionnement des placettes ;
- d'éliminer tout artefact lié à la fertilisation au sillon (on considère l'état du sol avant sillonnage, donc la part de fertilité intrinsèque et la part liée au précédent cultural) ;
- et enfin, d'éviter toute intervention destructive sur les placettes installées (prélèvements de sol...).

2.2.3. Les données agronomiques, l'itinéraire

Les placettes, au nombre de 10 par sous-parcelle lors du cycle de maïs (20 au total), de 14 lors du cycle de haricot (28 au total) représente 10 m linéaires de comptage.

Elles couvrent en fait : 3 rangs de 3.33 m dans le cas du maïs, 4 rangs de 2.5 m dans le cas du haricot (soit environ 7 m² compte tenu de l'écartement des rangs de l'ordre de 0.7 m). Ce dispositif permet de constituer des blocs plus homogènes, précisément repérés dans l'espace parcellaire et inclus dans le dispositif de mesure des données édaphiques.

Le paramètre agronomique principal obtenu et utilisé dans cette étude est le rendement, exprimé en poids de grain sain produit par placette (à 83% de matière sèche pour le haricot, 85% pour le maïs).

Les données édaphiques mesurées en août 89 ont été attribuées aux placettes du cycle de maïs (septembre 89 - mars 90), les données édaphiques mesurées en mars 90 (après travail de la sous-parcelle labourée) ont été attribuées aux placettes du cycle de haricot (mars 90 - août 90). Au plan de la chimie du sol, les données interpolées pour chaque placette ne prend pas en compte l'apport de matière organique au sillon après labour et avant semis de haricot (10 t/ha de compost de géranium) ni les apports d'engrais minéraux effectués en cours de cycle (pour le haricot : 500 kg/ha de 10-20-20 au semis ; pour le maïs : 500 kg/ha de 15-07-24 en deux apports -semis puis levée- puis 50 unités d'azote -ammonitrate- au stade 8-10 feuilles).

Les différentes opérations de mesure (données sol, données agronomiques) ont été pour chacune d'elles, concentrées sur un minimum de temps afin d'éviter toute variabilité temporelle des paramètres.

2.2.4. Distribution et structure de variabilité spatiale des variables

L'ensemble des paramètres mesurés sur l'ensemble du dispositif suivent des lois de distribution de type normal.

Conformément aux observations réalisées sur la masse volumique γ_d et la teneur en eau θ du matériau (chapitre III.1.3.), nous avons pu constater que la distribution des paramètres étudiés sur la sous-parcelle labourée ne présentaient pas de dérive et étaient le plus souvent purement aléatoires (dès le pas minimum choisi $h=4$ m, la semi-variance est atteinte), ou la variance péritique est telle qu'elle masque toute dépendance spatiale entre mesures proches. Ce n'est pas le cas dans la zone non labourée, où certains paramètres chimiques présentent une structure de variabilité continue, dans laquelle les semi-variances augmentent linéairement en fonction de la distance entre couples de points, ce comportement est généré par une taille du dispositif trop réduite et témoigne de l'incidence prédominante de facteurs autres que ceux liés à la mise en culture (organisation de la couverture pédologique dans le paysage).

La faible quantité de points d'observation agronomiques (placettes) ne permet pas d'établir correctement la structure de variabilité des rendements (plus d'une cinquantaine de paires de points équidistants est nécessaire pour établir de façon valide chaque semi-variance).

En tout état de cause, si une approche descriptive qualitative est toujours valide en vue de mettre en relation l'ensemble des données obtenues, une explication déterministe quantitative consistant à mettre en relation les rendements des placettes avec les paramètres édaphiques qui leur sont attribués se heurte à la possible autocorrélation entre observations, réductrice en statistique classique (dépendance des observations, tirage non aléatoire). Les résultats obtenus par cette approche pourront être valides pour les données mesurées sur la zone labourée, ceux obtenus sur la zone non labourée devront être interprétés avec prudence.

2.3. Etablissement des rendements en maïs : paramètres édaphiques, type d'horizon et itinéraires de préparation de sol

Concernant le maïs et compte tenu de ces potentialités d'enracinement, il est apparu intéressant d'exploiter les données relatives au sol obtenues selon deux profondeurs : 10 - 15 cm et 30 - 35 cm. Les placettes ont été discriminées selon l'itinéraire de préparation de sol (labour ou non) et dans la zone non labourée selon le type d'horizon observé à 10 cm (sub-affleurant) : Aa structuré ou Sa massif (zones décapés par l'érosion hydrique). La figure III.76. relate l'ensemble des données chimiques obtenues sur les placettes.

2.3.1. Statistique des données obtenues par placette

Les moyennes, écarts types et coefficients de variation sont calculés par itinéraire et par profondeur. Dans le cas de la parcelle non-labourée, 2 situations sont discernées : ensemble des 10 placettes, et ensemble des placettes moins 3 situées sur l'horizon Sa directement affleurant, soit 7 placettes.

Le tableau III.77. relate ces paramètres de moyenne et de dispersion.

Figure III.76. : Données relatives à la chimie du substrat obtenues sur les 20 placettes agronomiques du cycle de maïs 1989.

n° placette	Rendement	horizon (10-15 cm)	itinéraire	Azote		Carbone		Calcium		Potasse		CEC		Pho.ass		pH	
				P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
1	3390	LAa / LSa	labour	7.32	5.27	8.24	7.14	2.98	1.86	0.106	0.061	5.37	4.51	324	273	5.19	5.12
2	2040	LAa / LSa	labour	6.63	6.93	7.77	9.08	1.43	2.36	0.096	0.057	3.33	4.88	327	401	5.2	5.31
3	3440	LAa / LSa	labour	7.17	7.3	8.7	9.08	2.39	1.44	0.089	0.052	3.69	4	530	393	5.27	5.2
4	2470	LAa / LSa	labour	6.8	5.59	8.11	6.87	2.43	1.19	0.133	0.036	4.71	3.85	334	329	5.18	4.99
5	2340	LAa / LSa	labour	7	6.69	8.89	9.3	3	1.53	0.181	0.042	4.56	4.08	459	460	5.27	5.16
6	2780	LAa / LSa	labour	8.49	3.59	9.36	5.15	1.76	0.63	0.172	0.051	3.64	2.97	414	396	5.21	5.22
7	2730	LAa / LSa	labour	7.72	6.86	10.47	8.89	5.17	1.75	0.152	0.034	6.14	4.1	578	346	5.43	5.19
8	2280	LAa / LSa	labour	6.78	3.79	8.23	5.41	2.88	2.31	0.135	0.094	4.82	5.14	415	286	5.36	5.16
9	2570	LAa / LSa	labour	7.51	6.57	8.63	9.15	2.83	1.66	0.054	0.046	4.97	3.86	466	467	5.41	5.18
10	2590	LAa / LSa	labour	7.53	3.77	9.55	5.01	3.83	1.12	0.358	0.024	5.27	3.78	488	310	5.35	5.17
11	2360	Aa	non labour	7.62	7.66	9.73	9.98	2.6	1.33	0.087	0.046	4.15	3.81	347	297	5.3	5.15
12	1730	Aa	non labour	7.1	3.58	9.91	6.2	6.26	0.71	0.118	0.032	8.14	3.21	335	233	5.78	5.24
13	910	Sa	non labour	4.22	2.22	6.27	3.75	1.05	0.24	0.065	0.016	2.39	1.82	198	217	5.3	5.14
14	1660	Aa	non labour	6.48	6.83	8.68	9.45	2.43	1.98	0.043	0.027	4.03	4.38	309	351	5.47	5.38
15	2230	Aa	non labour	7.27	4.11	9.55	6.57	3.72	0.97	0.193	0.063	5.57	3.15	355	250	5.5	5.16
16	1690	Sa	non labour	6.39	3.49	7.98	5.91	2.07	0.35	0.068	0.035	3.06	1.48	292	212	5.31	5.21
17	1170	Sa	non labour	5.49	2.72	8.32	4.97	2.87	0.14	0.087	0.01	3.67	1.2	230	160	5.43	4.83
18	2040	Aa	non labour	7.89	6.82	9.7	8.91	4.48	1.49	0.13	0.031	6.78	4.16	414	448	5.56	5.15
19	2470	Aa	non labour	8.17	5.56	9.07	7.49	5.11	0.37	0.08	0.028	6.7	2.92	478	261	5.51	5
20	2550	Aa	non labour	6.5	4.92	8.65	6.52	3.7	0.95	0.118	0.033	5.58	2.72	529	286	5.51	5.24

Unités :

Rendement : en grammes de grains sains à 85% de MS récoltés par placette

Azote : total pondéral pour mille

Carbone : organique (Anne) pondéral %

Phosphore : assimilable (Olsen-Dabin) en ppm

Calcium

Potassium : en méq/100g (Hexamine cobalt)

CEC

P1 : prélèvement effectué à 10-15cm

P2 : prélèvement effectué à 30-35cm

Figure III.77. Statistique des données relatives au placettes : moyenne, écart type, coefficient de variation. (cycle maïs 1989, Fond Jardin)

Zone labourée	P1 : 10-15cm	Azote	Carbone	Calcium	Potasse	CEC	Phosph. ass	pH	Masse vol. app.	Ten. en eau vol.	Rendement
	moyenne	7.3	8.8	2.87	0.148	4.65	433.5	5.29	0.568	0.359	2663
	écart-type	0.554	0.809	1.053	0.084	0.879	87.45	0.094	0.077	0.043	452.3
	C.V.%	7.6	9.2	36.7	56.5	18.9	20.2	1.8	13.5	12	17
	P2 : 30-35cm										
	moyenne	5.64	1.59	1.59	0.05	4.12	366.1	5.17	0.54	0.442	-
	écart-type	1.458	0.532	0.532	0.019	0.611	68.19	0.081	0.052	0.04	-
	C.V.%	25.9	33.4	33.5	38.6	14.8	18.6	1.6	9.7	9	-
Zone non labourée	P1 : 10-15cm										
	moyenne	6.71	8.79	3.43	0.0989	5.01	348.7	5.47	0.614	0.434	1881
	écart-type	1.188	1.1	1.549	0.043	1.844	102.9	0.147	0.115	0.072	550.5
	C.V.%	17.7	12.5	45.2	43.2	36.8	29.5	2.7	18.8	16.5	29.3
	P2 : 30-35cm										
	moyenne	4.79	0.85	0.85	0.0321	2.89	271.5	5.15	0.458	0.525	-
	écart-type	1.875	0.607	0.607	0.015	1.099	81.19	0.148	0.084	0.058	-
	C.V.%	39.1	71.4	71.2	45.8	38	29.9	2.9	18.4	11	-
Zone non labourée sauf points sur Sa affleurant	P1 : 10-15cm										
	moyenne	7.29	9.33	4.04	0.109	5.85	395.3	5.52	0.661	0.4	2148.6
	écart-type	0.653	0.522	1.363	0.047	1.482	81.76	0.142	0.1	0.039	351.5
	C.V.%	9	5.6	33.7	43.3	25.3	20.7	2.6	15.2	9.8	16.4
	P2 : 30-35cm										
	moyenne	5.64	1.11	1.114	0.0371	3.48	303.7	5.19	0.467	0.494	-
	écart-type	1.527	0.533	0.533	0.013	0.64	74.3	0.116	0.098	0.024	-
	C.V.%	27.1	47.8	47.8	35.1	18.4	24.5	2.24	21	4.9	-

□ Paramètres chimiques

Concernant les paramètres chimiques, les observations synthétiques suivantes peuvent être faites :

- la zone non labourée présente globalement des teneurs moindres pour l'ensemble des caractéristiques chimiques ; même en faisant abstraction des points situés sur l'horizon Sa affleurant, cette tendance subsiste pour les teneurs en potasse et phosphore assimilable ; ces résultats concordent avec les observations de terrain qui montrent une épaisseur moyenne de l'horizon Aa initialement inférieure sur la zone non labourée (décapage plus intense...) ;
- cette différence se traduit par des rendements moyens supérieurs sur les placettes de la zone labourée ; en terme d'itinéraire, ce résultat est contradictoire avec ceux obtenus par ailleurs dans d'autres essais thématiques "travail du sol sous maïs", souvent réalisés sur des sols moins dégradés cependant ;
- l'ensemble des paramètres présentent des valeurs moindres à 30 - 35 cm qu'à 10 - 15 cm ; la différence devient spectaculaire pour les valeurs de carbone organique total ;
- l'affleurement direct de Sa sur 3 placettes de la zone non labourée induit des différences nettes au plan chimique pour l'ensemble des mesures, y compris en profondeur : pour les teneurs en azote, en carbone et en potasse (surtout à 30 - 35 cm), en calcium, en phosphore assimilable (surtout à 10 - 15 cm) ;
- l'impact du travail du sol semble être de deux ordres : homogénéisation des teneurs pour les placettes (surtout sensible à 30 - 35 cm) et dilution / mélange dans le profil ; après deux années de culture (4 cycles et deux labours), on n'observe pas de phénomène de minéralisation de la matière organique ;
- on notera la grande homogénéité du pH.

En positionnant les données obtenues sur la grille d'interprétation proposées par le Laboratoire d'Analyses Eaux-Sols-Plantes du CIRAD-IRAT Réunion (tableau III.78.), on observe que mis à part l'azote dont les teneurs sont plutôt considérées comme fortes à 10 - 15 cm, moyennes à 30 - 35 cm, et le phosphore assimilable assez homogène et moyen partout, les éléments minéraux présentent des teneurs faibles à 10 - 15 cm, à très faibles à 30 - 35 cm : la potasse et la CEC ont des niveaux particulièrement bas.

□ Paramètres physiques

Concernant les deux paramètres physiques abordés, γ_d et θ :

- dans le cas du labour, les valeurs de masse volumique sèche sont homogénéisées sur les placettes et sur le profil (ameublissement, mélange des horizons, assèchement induit) ; sur la zone non labourée, on observe nettement la discrimination horizon Aa ou Sa séché / horizon sous jacent Sa ; l'effet du labour de premier cycle est encore sensible puisque les valeurs de γ_d sont plus faibles sur la sous-parcelle travaillée ;
- pour les deux profondeurs, la teneur en eau volumique est plus faible sous labour, reflétant une différence de stock d'eau lié au travail du sol et entretenue pendant la saison sèche ; on peut penser que cette différence va être annulée progressivement au cours du cycle de maïs (début de saison pluvieuse).

Déterminations / méthodes :	Seuils :	faible	moyen	fort	très fort
pH		5	5.5	6	7
N total p.mille		2	4	6	8
C Anne %		2.8	5.6	8.4	11.2
Phos. ass. Olsen-Dabin ppm		100	200	400	600
Ca :		2	4	6	10
K : Hexamine Cobalt		0.1	0.2	0.5	1
CEC : m ^{eq} /100g		5	10	15	20

Déterminations / méthodes :	Seuils :	très faible	faible	moyen	fort	très fort
pH		5		5.5	6	7
N total p.mille		2		4	6	8
C Anne %		2.8		5.6	8.4	11.2
Phos. ass. Olsen-Dabin ppm		100		200	400	600
Ca :		2		4	6	10
K : Hexamine Cobalt		0.1		0.2	0.5	1
CEC : m ^{eq} /100g		5		10	15	20

2.3.2. Approche qualitative

L'établissement de tableaux de contingence (tableau de Burt, disjonctif complet) en répartissant les valeurs de variables en classes (équilibrées, sans recherche de validité agronomique) permet de mettre en évidence le degré d'indépendance entre deux variables (test de conformité de contingence, non paramétrique ; BOURSIN, 1981) (voir annexes).

☐ Données obtenues à 10 - 15 cm

Le calcul des χ^2 de contingence montre que l'hypothèse d'indépendance est rejetée entre :

- carbone et azote ; carbone et calcium (avec une probabilité de plus de 95%),
- carbone et phosphore (P > 99%),
- CEC et calcium (P > 99%),
- pH et calcium (P > 95%),
- type d'horizon affleurant / itinéraire et carbone (P > 95%),
- type d'horizon affleurant / itinéraire et CEC ; teneur en eau ; pH (P > 99%),
- rendement et potasse ; phosphore (P > 95%).

☐ Données obtenues à 30 - 35 cm

Le calcul des χ^2 de contingence montre que l'hypothèse d'indépendance est rejetée entre :

- carbone et azote (P > 99%),
- CEC et calcium (P > 99%),
- teneur en eau et : calcium ; CEC ; masse volumique ; phosphore (P > 95%),
- type d'horizon / itinéraire et : calcium ; masse volumique ; phosphore ; teneur en eau (P > 95%),

☐ Toutes données confondues

- type d'horizon /itinéraire et rendement (P > 99%),
- teneur en eau à 10-15 cm et : teneur en eau à 30-35 cm ; phosphore à 30-35 cm ; pH à 30-35 cm (P > 99%).

☐ AFC multiple

La réalisation d'une analyse factorielle des correspondances multiples (DAGNELIE, 1975) soulignent également ces relations (voir annexes), l'observation de la répartition des modalités selon les deux axes principaux montre :

- la forte inter-dépendance existant entre variables édaphiques, l'association des classes de valeurs faibles et fortes est concomitante pour azote - carbone - calcium - CEC - phosphore, pour azote et potasse, pour pH et calcium. Il s'agit de relations d'inter-dépendance liées au fonctionnement physico-chimique du sol ;

- l'implication de ces variables sur les valeurs de rendements ; pour les plus faibles, on voit nettement la liaison avec les faibles taux d'azote (surface et profondeur), de potasse (surface), de carbone (profondeur), avec la masse volumique faible dès la surface (Sa affleurant) ; les forts rendements sont reliés à de faibles teneurs en eau et de fortes masses volumiques (Aa affleurant), à de forts taux d'azote, de CEC, de potasse, de calcium, de phosphore, de carbone (en profondeur).

2.3.3. Approche quantitative : mise en relation des variables

☐ Relations entre variables édaphiques

Les données sont mises en relation graphique deux à deux en prenant en compte le type d'horizon affleurant et l'itinéraire. La répartition des teneurs d'un élément dans le profil cultural et l'incidence de la nature du substrat ou du travail du sol peuvent être montrées. Les figures III.79-80-81-82-83. exposent ces relations pour l'azote, le phosphore, la potasse, la CEC et le calcium.

On constate pour l'ensemble un comportement particulier du matériau Sa non labouré, sur lequel les teneurs en éléments nutritifs sont plus faibles pour les deux profondeurs observées.

Concernant l'azote et le phosphore, d'une part les valeurs obtenues selon les deux profondeurs ne sont pas très différentes, d'autre part le travail du sol ne modifie pas la répartition.

Concernant la CEC et les bases échangeables K et Ca, la répartition est plus marquée entre les deux profondeurs, et le labour semble induire une répartition plus homogène, particulièrement nette pour la CEC et le calcium.

☐ Explication des rendements

Si l'on discrimine les rendements obtenus selon les deux itinéraires, des éléments importants sont mis en évidence :

Sur la zone labourée, aucun paramètre édaphique ne peut expliquer significativement le rendement.

Sur l'ensemble de la zone non labourée, des relations linéaires simples peuvent être établies, significatives au seuil 99% avec l'azote et le phosphore à 10 - 15 cm ; significative au seuil 95% avec le carbone, la teneur en eau à 10 - 15 cm (droite de régression de pente négative), avec l'azote et la potasse à 30 - 35 cm.

Un modèle de régression multiple significatif au seuil 99% peut être construit avec le phosphore (10 - 15 cm) et la potasse (30 - 35 cm), expliquant 94% des variations de rendements. Cela indique que sur parcelle non labourée, et dans une phase de croissance racinaire plus avancée du maïs (30 - 35 cm), le taux de potasse deviendrait un facteur limitant important. Ce phénomène n'est pas observé sur le traitement labouré (homogénéisation). Il apparaît que l'établissement des rendements dépend essentiellement de la nature du substrat affleurant, traduite par les teneurs en différents éléments et par la teneur en eau volumique. Si l'on soustrait à l'analyse statistique les points situés sur le matériau Sa affleurant, aucun modèle explicatif significatif ne peut être plus être construit.

Pour l'ensemble des placettes, une mise en relation graphique du rendement, exprimé en fonction des teneurs en éléments nutritifs majeurs, illustre ces comportements et souligne l'incidence du

type d'horizon affleurant et de l'itinéraire technique à l'échelle parcellaire (figures III.84-85-86-87.). Les seuils utilisés par le Laboratoire d'Analyses de Sols du CIRAD-Réunion, pour l'interprétation des analyses effectuées sur sols andiques non perhydratés, sont indiqués. En deçà de ces limites, les teneurs sont considérées comme faibles, au dessus, moyennes. En fonction de ces seuils, on observe les valeurs très faibles de potasse à 30 -35 cm, expliquant l'importance de ce paramètre dans l'établissement des rendements en maïs.

Figure III.79. Teneurs en azote total (p.mille) selon deux profondeurs et selon le type de substrat.

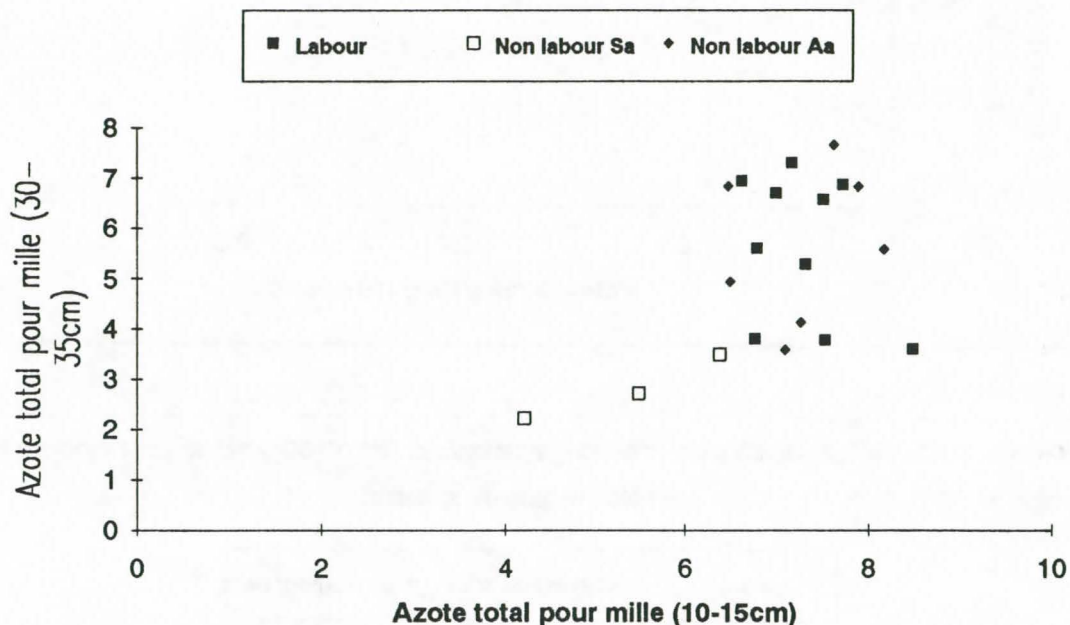


Figure III.80. Teneurs en phosphore assimilable (ppm) selon deux profondeurs et selon le type de substrat.

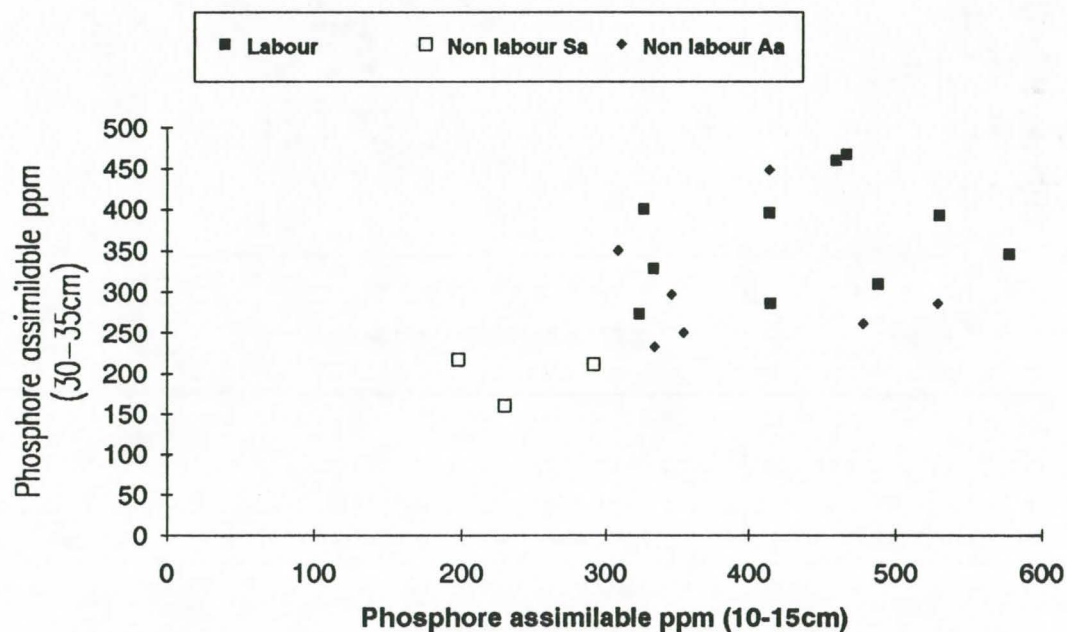


Figure III.81. Teneurs en potasse (méq/100g) selon deux profondeurs et selon le type de substrat.

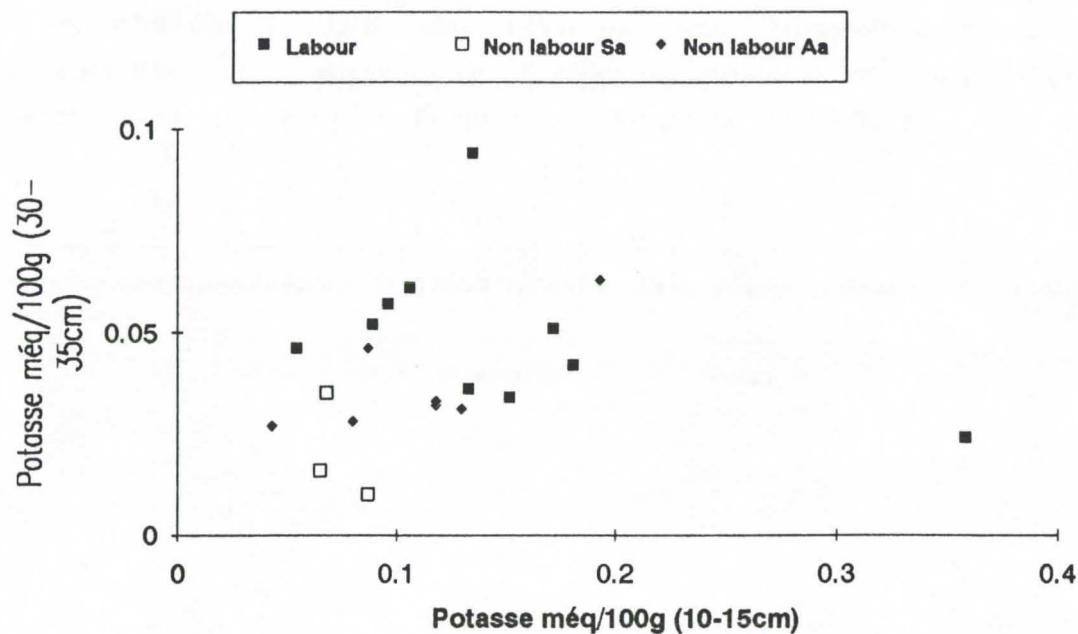


Figure III.82. Valeurs de capacité d'échange cationique (méq/100g) selon deux profondeurs et selon le type de substrat.

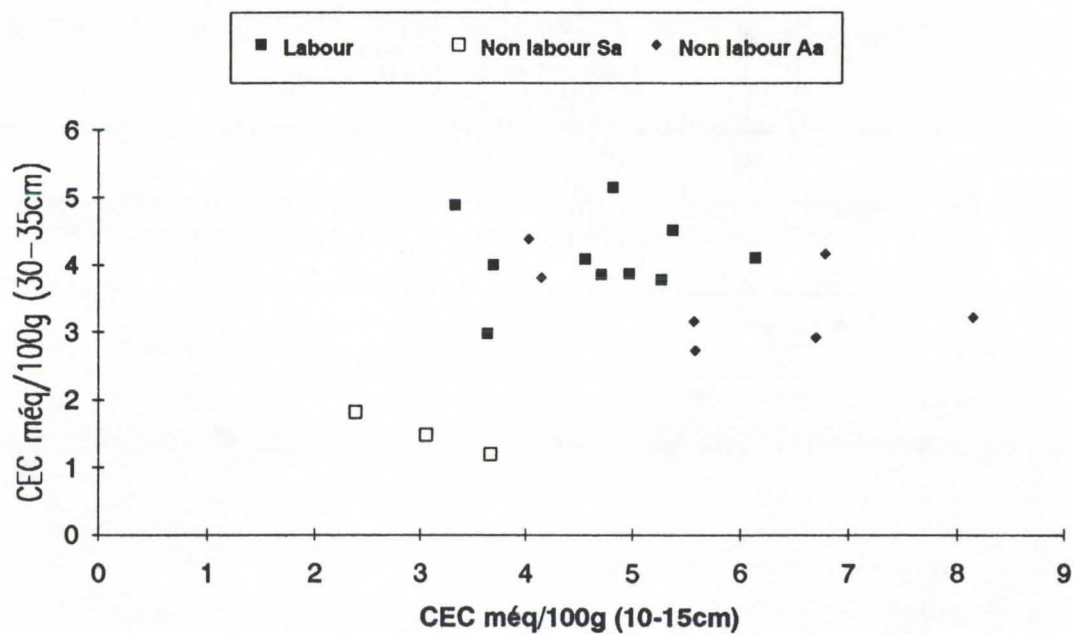


Figure III.83. Teneurs en calcium (méq/100g) selon deux profondeurs et selon le type de substrat.

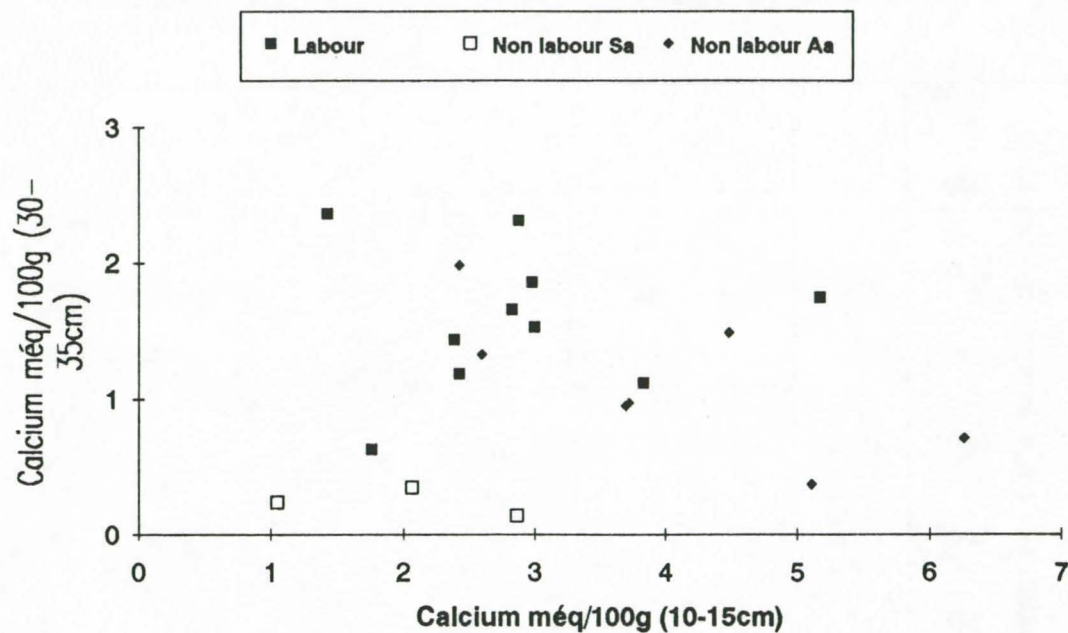


Figure III.84. Expression du rendement des placettes en fonction des teneurs en potasse à 30 - 35 cm et selon le type de substrat.

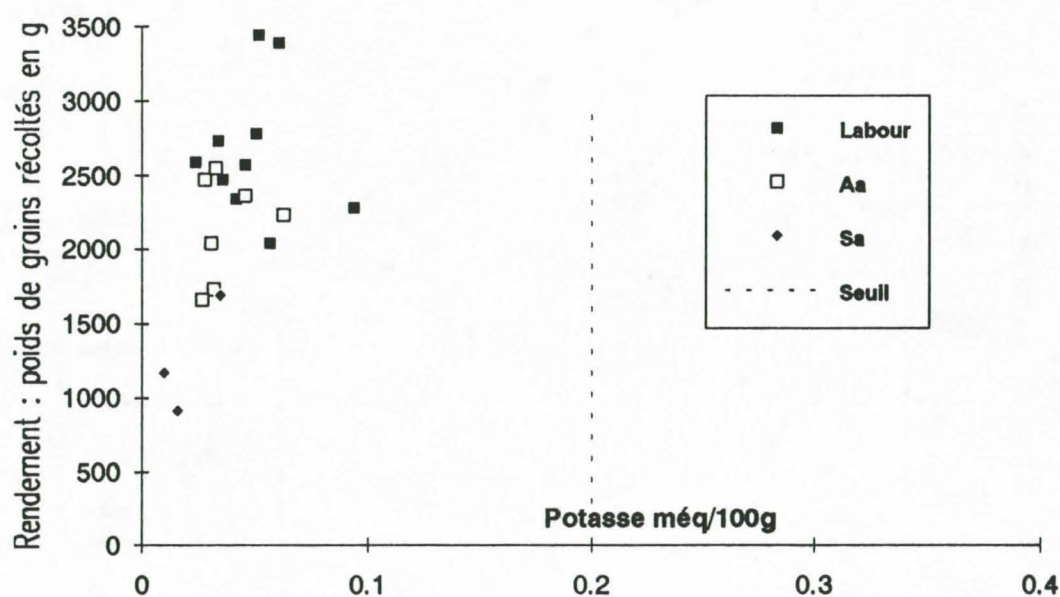


Figure III.85. Expression du rendement des placettes
en fonction des teneurs en azote à 10 - 15 cm et selon le type de substrat.

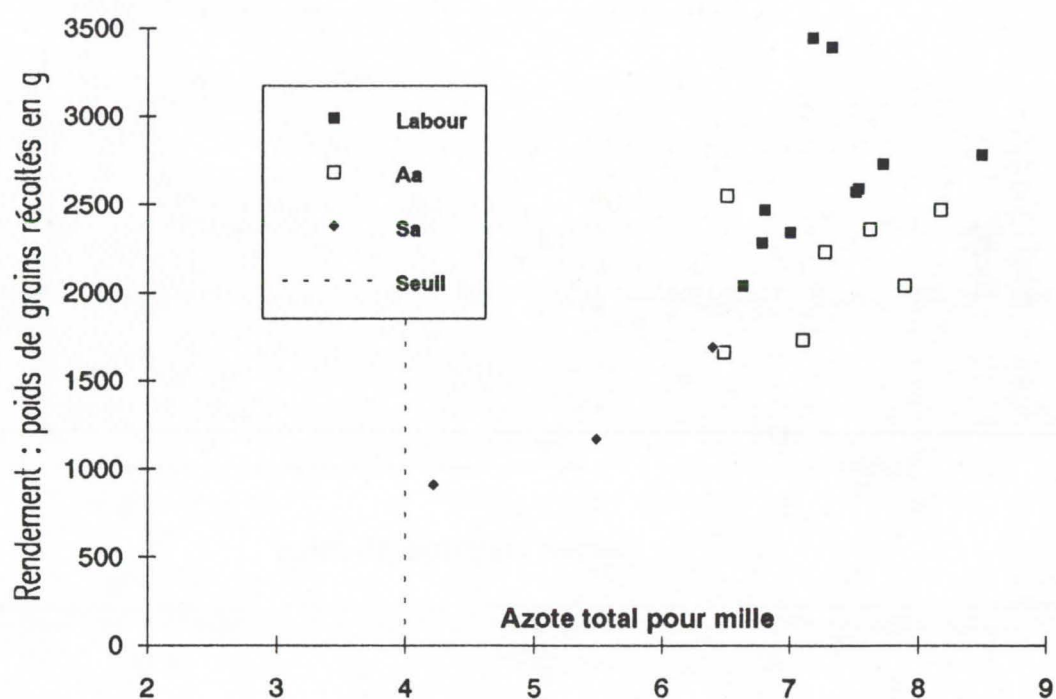


Figure III.86. Expression du rendement des placettes
en fonction des teneurs en azote à 30 - 35 cm et selon le type de substrat.

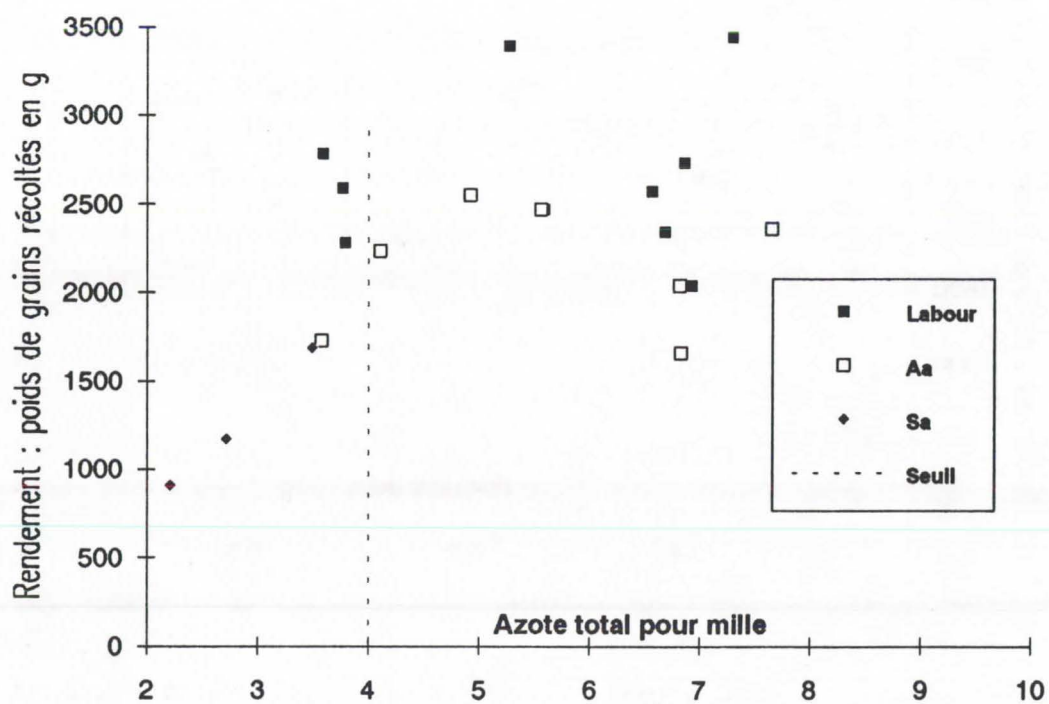
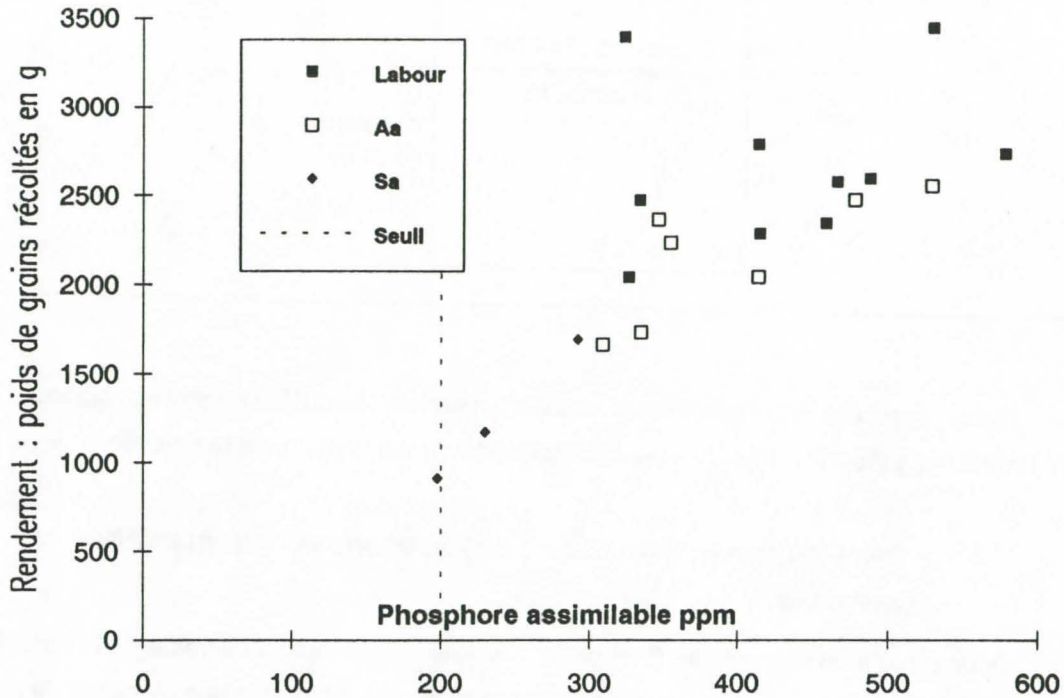


Figure III.87. Expression du rendement des placettes

en fonction des teneurs en phosphore à 10 - 15cm et selon le type de substrat.



2.3.4. Approche cartographique

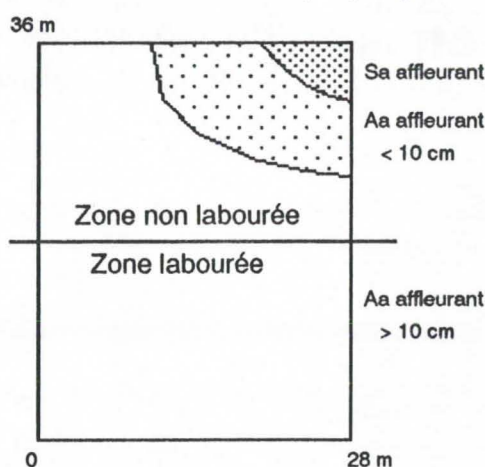
A partir des données ponctuelles spatialisées obtenues pour différents paramètres, une cartographie parcellaire est réalisée. Compte tenu du traitement global de la parcelle, prenant en compte les deux itinéraires, le krigeage n'est pas retenu. Le tracé de limites isovaleurs est donc calculé sans considérer la structure de variabilité spatiale, par simple interpolation à partir des valeurs z_i des n points i voisins, pondérées par leur distance d_i au point z à calculer :

$$z = \left[\left(\sum_{i=1}^n z_i / (d_i)^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^n 1 / (d_i)^2 \right) \right]$$

Les cartes obtenues (8-9-11-12) représentent la répartition parcellaire des teneurs en azote à 10 - 15 et 30 - 35 cm, en phosphore à 10 - 15 cm et en potasse à 30 - 35 cm. Ces paramètres ont été cernés comme les plus déterminants des rendements en maïs par placettes (carte 10).

Ces cartes soulignent nettement la concordance d'une zone de faible fertilité (rendements faibles) et d'une zone de faible teneur en l'ensemble des éléments N P K : il s'agit d'un secteur érodé et dégradé où l'horizon Sa affleure (détecté par une prospection à la tarière -carte 7-). Ailleurs, les relations chimie du substrat / rendement sont moins nettes.

Carte 7 : Types d'horizons affleurants, déterminés par prospection à la tarière sur le dispositif.



Cette approche cartographique visuelle relativise les déterminismes globaux cernés et soulignent l'incidence prépondérante du type d'horizon affleurant à l'échelle de la parcelle.

2.3.5. Rendements en maïs : observations complémentaires et généralités

Pour le cycle de maïs étudié (2^{ème} cycle 1989), le rendement d'ensemble de la parcelle labourée est supérieur à celui de la parcelle non labourée, cela est répercuté à l'échelle des placettes du dispositif.

Rappelons que ce résultat est contraire aux observations faites sur d'autres parcelles (MICHELLON, GARIN, 1985 ; PIROT, MICHELLON, 1986 ; 1987 ; PERRET, 1988) et sur le cycle de l'année suivante (2^{ème} cycle 1990) sur la même parcelle. Il convient de souligner cependant la difficulté de comparaison objective de rendements obtenus sur des parcelles soumises à des itinéraires très différents au plan de la préparation des substrats, itinéraires induisant des densités de semis puis de plants à la récolte parfois très hétérogènes.

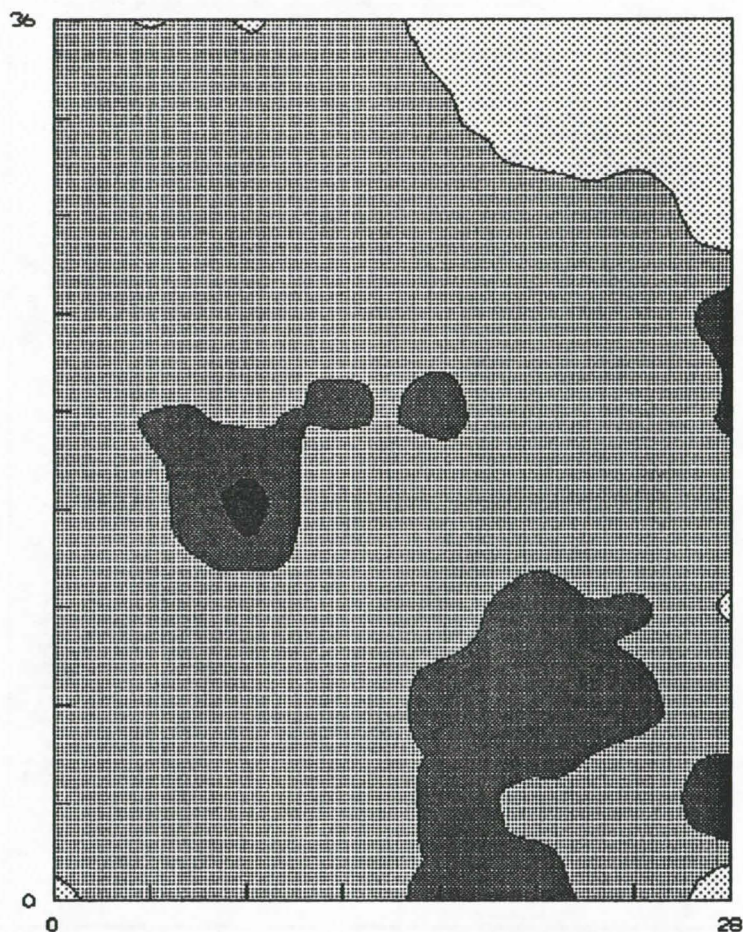
D'ailleurs, le résultat atypique obtenu en 1989 peut s'expliquer par une densité de semis supérieur constaté sur la parcelle non labourée, ce sur-semis a pu pénaliser le développement des plants (fragilisation des tiges). Une forte sensibilité à la verse (pieds cassés par le vent) a été constatée sur cet itinéraire.

Sur l'ensemble du site de Fond Jardin, les essais thématiques conduits sur sol peu dégradé (cas de notre parcelle) et sur sol très dégradé (Sa et tuf / basalte affleurant) montrent les tendances suivantes :

- sur sol peu dégradé, le travail du sol semble globalement homogénéiser et diminuer les rendements,
- sur sol très dégradé, aucun effet significatif n'est noté.

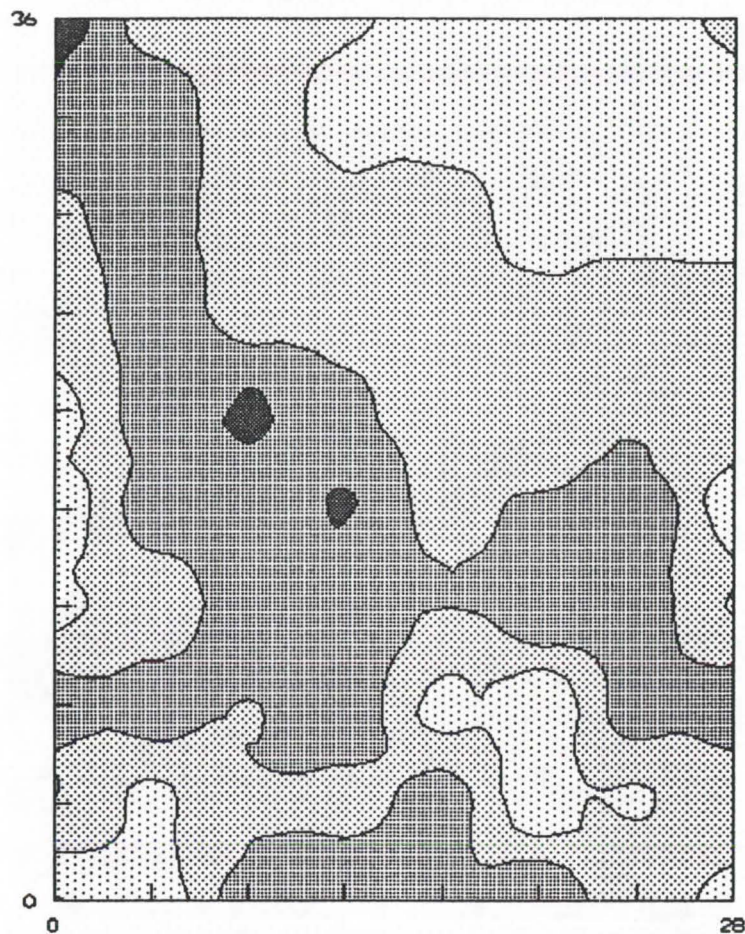
Carte 8 : Distribution des teneurs en azote total (pour mille) relevées à 10 - 15 cm,
sur la parcelle expérimentale de Fond Jardin (août 1989).

Classes de valeurs : >10 / 8-10 / 6-8 / <6



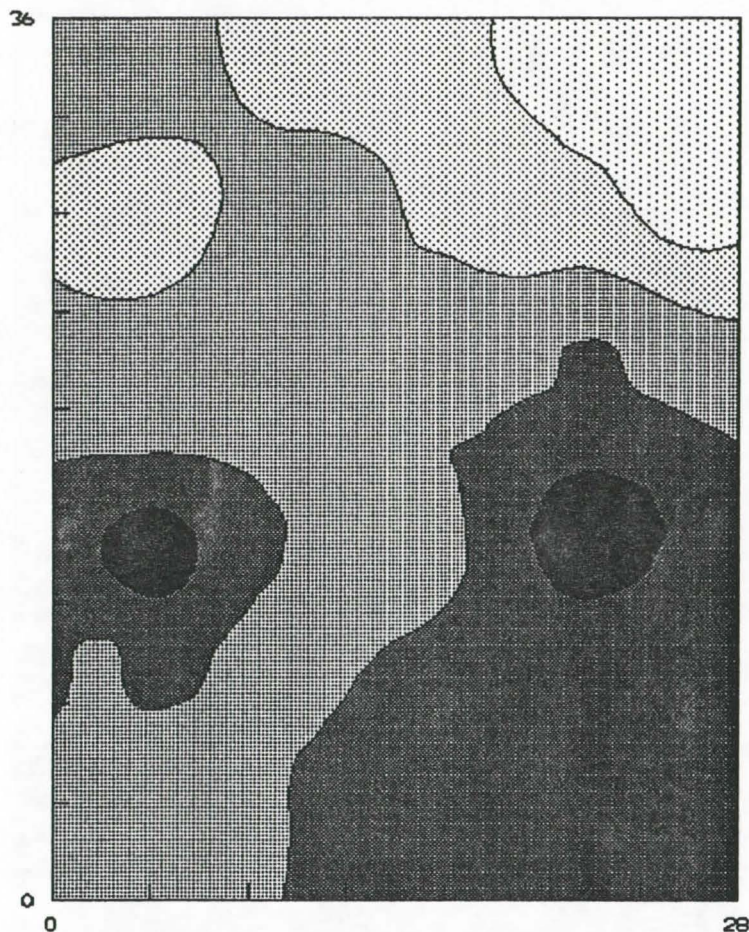
Carte 9 : Distribution des teneurs en azote total (pour mille) relevées à 30 - 35 cm,
sur la parcelle expérimentale de Fond Jardin (août 89).

Classes de valeurs : >8 / 6-8 / 4-6 / <4



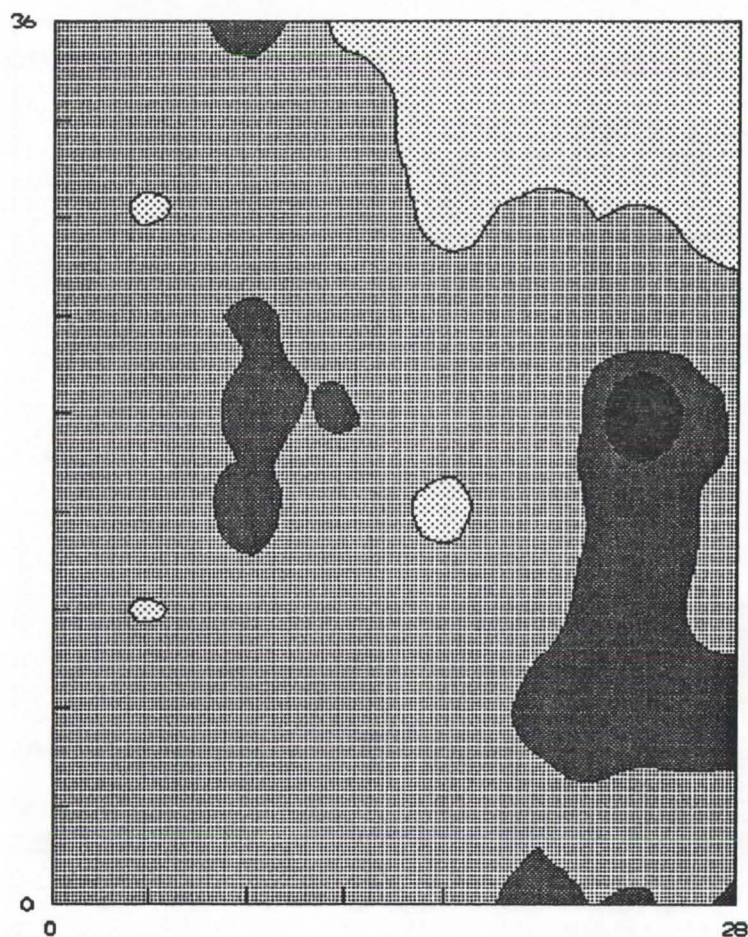
Carte 10 : Distribution des rendements en maïs par placettes (grammes de grain à 85 %ms)
sur la parcelle expérimentale de Fond Jardin (2^{ème} cycle 89 : septembre 89 - mars 90).

Classes de valeurs : >3000 / 2500-3000 / 2000-2500 / 1500-2000 / <1500



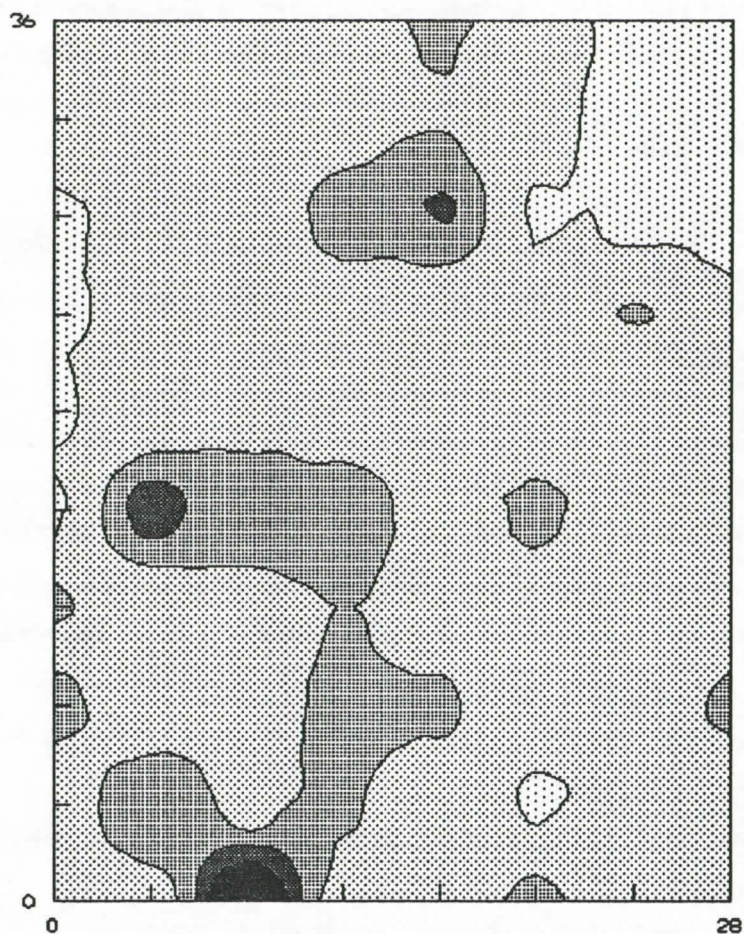
Carte 11 : Distribution des teneurs en phosphore assimilable (ppm) relevées à 10 - 15 cm,
sur la parcelle expérimentale de Fond Jardin (août 89).

Classes de valeurs : >700 / 500-700 / 300-500 / <300



Carte 12 : Distribution des teneurs en potassium (méq/100g) relevées à 30 - 35 cm,
sur la parcelle expérimentale de Fond Jardin (août 89).

Classes de valeurs : >0.14 / $0.10-0.14$ / $0.06-0.10$ / $0.06-0.02$ / <0.02



2.4. Etablissement des rendements en haricot : paramètres édaphiques, type d'horizon et itinéraires de préparation de sol

Concernant le haricot et compte tenu de son développement racinaire réduit en profondeur : 25 à 30 cm (lié au type de matériau et à l'opération de semis au sillon), seules les données relatives au sol obtenues à 10 - 15 cm sont exploitées. Contrairement à ce qui avait été observé lors du cycle de maïs précédent, aucune placette de la sous parcelle non labourée n'est située sur du matériau Sa directement affleurant, ce traitement a donc été analysé d'un seul tenant. On compte 14 placettes par sous parcelle. Les figures III.88 et III.89. relatent l'ensemble des données recueillies et les paramètres statistiques issus de ces données réparties par itinéraire.

2.4.1. Statistique des données obtenues par placette

Concernant les paramètres chimiques et conformément aux données obtenues sur les placettes suivies lors du cycle précédent de maïs (en faisant abstraction des placettes situées sur Sa affleurant), les deux traitements ne présentent pas de différence importante pour la profondeur 10 - 15 cm : les teneurs moyennes en potasse et en phosphore assimilable sont un peu supérieures sur la zone labourée, la teneur en calcium un peu supérieure sur la zone non labourée. On notera l'homogénéisation des teneurs en phosphore sous labour, et la forte dispersion des teneurs en calcium et potasse.

Positionnées sur la grille d'interprétation (figure III.78.), ces données sont considérées comme globalement moyennes, les teneurs en azote sont plutôt fortes, les teneurs en potasse sont plutôt faibles.

Au plan des paramètres physiques, on observe toujours la masse volumique moindre sur la sous parcelle labourée ; en revanche, les teneurs en eau sont homogènes (fin de saison des pluies). Les valeurs de MWD sont peu différentes.

Les rendements obtenus sont significativement différents entre les deux traitements : très inférieurs et plus hétérogènes sur labour.

2.4.2. Approche descriptive qualitative

L'établissement d'un tableau de Burt (tableau de contingence des données réparties en classes croisées, voir annexes) montrent que les relations de dépendance entre variables sont moins évidentes que dans le cas du maïs.

A part une évolution concomitante des contingences entre azote et carbone, entre azote et phosphore, les relations les plus nettes apparaissent entre variables physiques : malgré la faible gamme de taille moyenne d'agrégats obtenue sur les parcelles (MWD), ce paramètre montre en particulier des relations nettes avec les teneurs en potasse et en calcium.

Les classes de rendements sont mal discriminées par les différents paramètres édaphiques. Seuls l'itinéraire et les classes de teneur en eau évoluent avec les rendements.

Figure III.88. : Données relatives aux placettes sous haricot (1990) (10 - 15 cm)

Placette	Rendement	Itinéraire	Azote	Carbone	Potasse	Calcium	Phosphore	Masse vol. s.	Ten. eau v.	MWD
1	490	labour	6.81	6.83	0.19	4.19	363	0.65	0.39	1.46
2	361	labour	6.74	7.1	0.2	4	370	0.66	0.39	1.44
3	457	labour	7.08	7.75	0.39	3.97	415	0.57	0.37	1.65
4	624	labour	7.5	8.06	0.17	5.19	410	0.61	0.39	1.78
5	734	labour	7.58	8.03	0.36	5.56	384	0.53	0.38	1.67
6	749	labour	7.39	7.52	0.14	2.69	341	0.6	0.41	1.52
7	951	labour	7.53	8.01	0.17	2.84	328	0.53	0.4	1.46
8	644	labour	8.13	8.07	0.19	3.7	383	0.6	0.37	1.51
9	1050	labour	7.39	8.27	0.19	5.23	322	0.63	0.44	1.53
10	1077	labour	7.29	7.74	0.13	2.65	328	0.57	0.41	1.35
11	1319	labour	7.37	7.94	0.11	2.9	334	0.57	0.44	1.46
12	1138	labour	6.28	8.06	0.25	3.02	365	0.58	0.42	1.56
13	1109	labour	7.64	8.55	0.23	2.99	382	0.59	0.41	1.61
14	997	labour	7.47	8.23	0.18	4.12	367	0.59	0.42	1.52
15	1166	sillon. direct	7.55	8.24	0.14	5.15	384	0.69	0.41	1.52
16	893	sillon. direct	8.21	8.6	0.17	4.37	460	0.68	0.41	1.5
17	962	sillon. direct	8.93	8.22	0.22	5.39	406	0.63	0.4	1.58
18	1034	sillon. direct	8.56	7.82	0.18	5.5	649	0.64	0.41	1.72
19	1345	sillon. direct	7.78	7.91	0.14	3.97	439	0.71	0.39	1.57
20	1140	sillon. direct	7.75	8.13	0.1	4.32	356	0.71	0.41	1.45
21	906	sillon. direct	8.42	8.27	0.22	5.64	372	0.65	0.4	1.58
22	1199	sillon. direct	7.35	7.37	0.17	4.9	319	0.7	0.41	1.62
23	1205	sillon. direct	7.85	7.1	0.29	4.58	246	0.66	0.45	1.7
24	1126	sillon. direct	7.61	7.8	0.05	3.68	315	0.69	0.37	1.4
25	1037	sillon. direct	7.21	8.58	0.08	4.45	305	0.7	0.41	1.62
26	1277	sillon. direct	6.34	8.08	0.22	6.94	256	0.6	0.46	1.9
27	1520	sillon. direct	6.46	7.47	0.26	3.88	195	0.68	0.38	1.32
28	898	sillon. direct	6.44	7.36	0.16	5.75	189	0.69	0.37	1.31

Unités :
Rendement : en grammes de grains sains à 83% de MS récoltés par placette
Azote : total pondéral pour mille
Carbone : organique (Anne) pondéral %
Phosphore : assimilable (Olsen-Dabin) en ppm
Calcium
Potassium : en méq/100g (Hexamine cobalt)
CEC

Figure III.89. : Statistiques des données relatives aux placettes sous haricot : moyenne, écart type, CV%.

		Rendement	Azote	Carbone	Potasse	Calcium	Phosphore	Masse vol. s.	Ten. eau v.	MWD
Zone labourée	moyenne	835.7	7.3	7.87	0.207	3.79	363.7	0.591	0.403	1.54
	écart-type	294.93	0.45	0.46	0.08	1	29.91	0.04	0.02	0.11
	CV%	35.3	6.2	5.8	38.6	26.4	8.2	6.8	5	7.1
Zone sillonnée	moyenne	1122	7.6	7.93	0.171	4.89	349.4	0.674	0.406	1.56
	écart-type	183.36	0.8	0.46	0.07	0.89	120.27	0.03	0.03	0.16
	CV%	16.3	10.5	5.8	40.9	18.2	34.4	4.5	7.4	10.3

Au plan statistique, le calcul des χ^2 de contingence sur le tableau de Burt montre que l'hypothèse d'indépendance est rejetée entre :

- masse volumique et : potasse ; calcium (avec une probabilité de plus de 95%),
- masse volumique et itinéraire (P > 99%),
- teneur en eau et : carbone ; rendement (P > 95%).

Les résultats obtenus semblent indiquer que les rendements des placettes de haricot sont moins dépendants des variables chimiques initiales du sol que le maïs ; l'opération de préparation du sol (traduite par des variables physiques) devient en revanche déterminante. Dans l'horizon superficiel préparé avant ce cycle, les relations entre variables physico-chimiques sont incertaines.

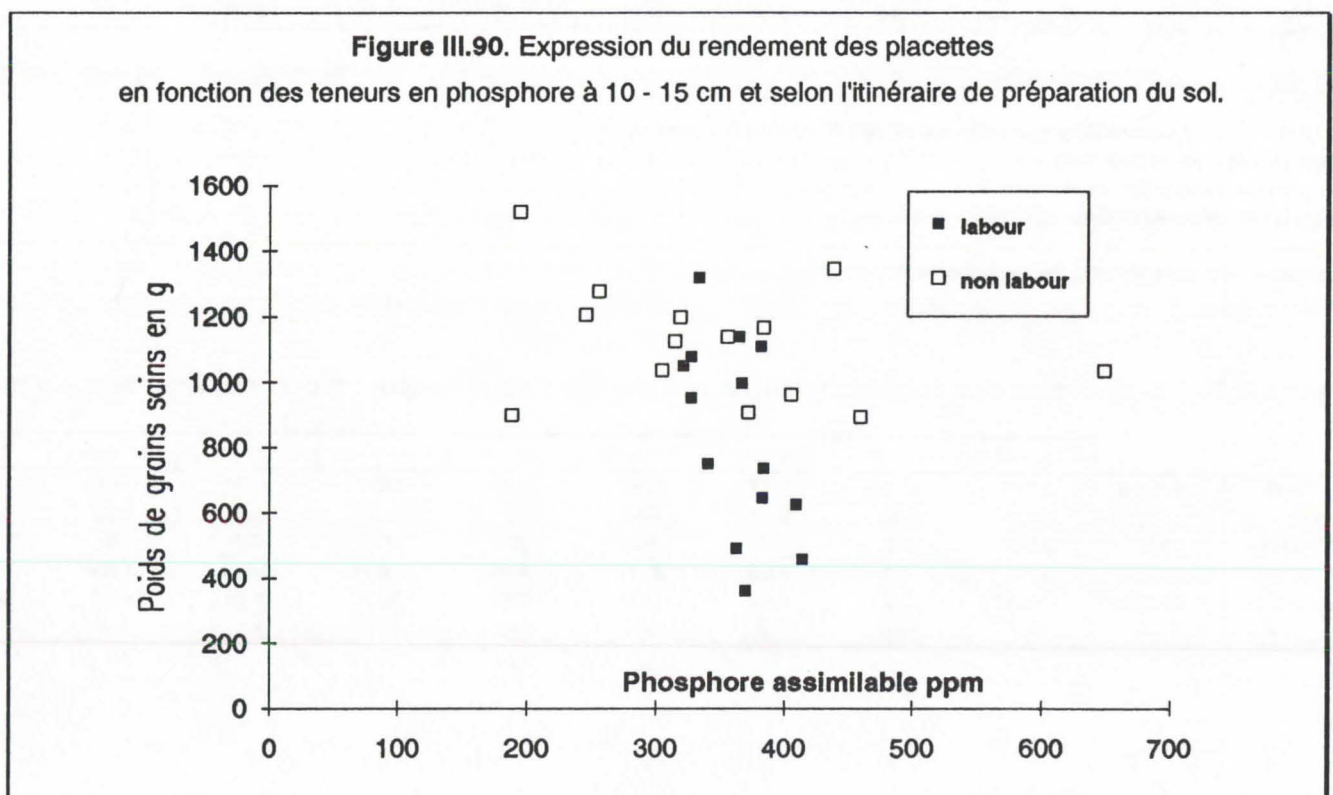
2.4.3. Approche quantitative : mise en relation des variables

La mise en relation graphique des variables deux à deux confirme l'absence de relation des variables édaphiques entre elles et avec les rendements par placette.

Statistiquement, aucune régression simple significative ne permet d'expliquer ces rendements. Des modèles de régression multiple peuvent être établis par traitement :

- avec θ et γ_d sur labour (88% de variance expliquée, signification au seuil 99%) ;
- avec l'azote, le calcium et la potasse sur travail minimum (71% de variance expliquée, signification au seuil 95%).

Ces modèles peu explicatifs soulignent cependant le type de facteurs limitant les rendements selon les deux itinéraires.



La figure III.90. représente la mise en relation des rendements par placettes exprimés en fonction des teneurs en phosphore assimilable. On distingue les deux itinéraires : rendements plus élevés et plus homogènes sur travail minimum, et forte variabilité des teneurs en phosphore ; rendements plus faibles et dispersés sur labour qui homogénéise les teneurs en phosphore. On met ainsi en évidence le processus de dilution / homogénéisation occasionné par le travail du sol, particulièrement net pour le phosphore.

2.4.4. Rendements en haricot : observations complémentaires et généralités

Pour le cycle de haricot étudié (1^{er} cycle 1990), le rendement d'ensemble de la parcelle labourée est inférieur à celui de la parcelle non labourée, cela est répercuté à l'échelle des placettes du dispositif.

Rappelons que ce résultat est en accord avec les observations faites sur d'autres parcelles (MICHELLON, GARIN, 1985 ; PIROT et MICHELLON, 1986, 1987 ; PERRET, 1988) , sur les cycles précédent (1989) et suivant (1991) sur la même parcelle. Contrairement au maïs, le haricot semble apte à compenser les différences de densité de semis.

L'ensemble des résultats obtenus laissent supposer que l'effet pénalisant du labour augmente avec le nombre de cycles conduits depuis la défriche initiale, gage d'homogénéité. Sur les parcelles de Trois Bassins-Cocâtre de mise en culture ancienne, les différences de rendement en haricot sont très forte, parfois du simple au double selon l'année entre labour et sillonage simple.

Un dispositif identique mis en oeuvre sur sol très dégradé (Sa et tuf / basalte affleurant) montre que le travail du sol n'induit pas d'effet sensible sur les rendements.

Des mesures effectuées sur les placettes en début de cycle indique une levée plus rapide sur la sous parcelle labourée (mesure du nombre de pieds levés par placette effectuées 21 jours après le semis : moyenne sur non labour = 53.4 ; sur labour = 96.5 ; écarts-type similaire proches de 20). Une mesure identique répétée 10 jours plus tard annule cette différence. Ce décalage initial du cycle se traduit à la récolte par un taux de matière sèche supérieur de 2 à 4 points sur les placettes labourées.

Rappelons que les cycles de haricot s'étendent pendant la saison sèche et que l'enracinement reste superficiel. Au plan physique, le stress hydrique occasionné par le travail du sol (cf chapitre III.1.3.) peut être à l'origine de la diminution des rendements. Au plan chimique, la nutrition minérale principalement superficielle et dépendante des intrants localisés au sillon ne permet pas l'expression nette de la fertilité intrinsèque du sol sur l'établissement des rendements.

2.5. Synthèse et conclusions

2.5.1. La méthode : traitement d'informations spatialisées et interpolation

La méthode proposée, qui sera utilisée pour l'étude des interactions sol-machine, permet d'aborder à l'échelle parcellaire les relations potentialités du sol - rendements des cultures. Et au delà de l'exploitation des informations spatialisées en vue d'interpolation, le dispositif permet un suivi de l'évolution temporel du substrat, que l'on peut associer à des variations climatiques intra et interannuelles.

Cette mise en relation directe est sur le principe contestable puisque le niveau brut de rendement atteint n'est pas, à lui seul, un bon révélateur de la fertilité d'un milieu. Le rendement résulte de relations complexes et hiérarchisées entre potentialités du milieu (climat et sol), potentialités de la culture en place, systèmes de culture et de production. Cet ensemble concourt à l'élaboration du rendement, qui prend en compte lui même l'histoire du peuplement cultivé (interactions entre plantes, phases critiques de développement...).

L'expérimentation à l'échelle parcellaire s'oppose à l'enquête-diagnostic multilocale (GRAS, 1981), essentiellement par le nombre de variables plus réduit, par l'émission d'hypothèses *a priori*, par la démarche analytique, par le contrôle du milieu que l'on suppose. L'expérimentation fournit des gammes de variation faibles pour l'ensemble des paramètres mesurés, elle permet en revanche de faire abstraction des variations spatiales d'un facteur déterminant : le climat, qui détermine le niveau potentiel de production de matière sèche. Les autres composantes du milieu limitent l'expression de ce potentiel.

La méthode retenue permet en outre de prendre en compte la variabilité du milieu.

Concernant l'interpolation par placette, si l'on peut compter *a priori* sur la durable validité des teneurs en éléments nutritifs (établies en début de chacun des cycles) et donc sur leur incidence objective sur l'établissement du rendement final, il n'en est pas de même pour les paramètres physiques, beaucoup plus sujets à variation temporelle (en particulier la teneur en eau), il apparaît indispensable de suivre l'évolution des valeurs selon une chronique calée sur le cycle, en des mesures ponctuelles qui complètent le dispositif de maillage. Ainsi, les valeurs de teneur en eau mesurée à la fin de la saison humide et attribuées aux placettes du cycle de haricot sont d'une grande homogénéité sur les deux traitements observés, le suivi de l'humidité du sol sur ces parcelles révèle un écart de stock lié au labour (cf chapitre III.1.3.) qui s'accroît au cours de la saison sèche et qui pourrait expliquer la différence de rendement final. Le phénomène est inverse pour le cycle de maïs précédent.

Dans le cadre de l'essai, les paramètres physiques -teneur en eau et masse volumique- sont plutôt des indicateurs de la nature de l'horizon affleurant.

2.5.2. Résultats expérimentaux

Au plan des relations entre variables chimiques, on observe la forte concordance de statut des différents éléments selon le type d'horizon cultural et selon la profondeur de mesure : la matière organique, le phosphore et les bases échangeables dépendent ensemble de la nature du substrat ; les teneurs sont toujours plus faibles lorsque le matériau Sa affleure, et en profondeur. La variabilité spatiale de ces éléments permet cependant d'établir des relations avec les comportements différents observés sur les placettes agronomiques.

Pour le maïs, on montre l'incidence des potentialités chimiques intrinsèques du sol sur l'établissement des rendements, dans la zone superficielle pour l'azote et le phosphore, et en profondeur où la faible teneur en potasse constitue un facteur limitant important.

On notera que la mise en relation graphique des variables deux à deux et la construction de modèle régressifs simples ou multiples se sont avérées intéressantes parce que l'on a pu disposer de placettes situées sur matériau affleurant Sa, beaucoup moins fertiles et qui contribuent à étendre les gammes de régresseurs et de rendements vers les valeurs faibles.

Les résultats obtenus sur un tel essai thématique permettent d'une part de souligner l'importance de la part de fertilité intrinsèque au substrat (hors intrants) et donc l'intérêt prédictif de l'analyse préalable de sol dans le cas d'une culture de maïs ; d'autre part de discuter de la validité des seuils proposés pour l'interprétation agronomique des teneurs en éléments nutritifs. Pour des teneurs en azote et phosphore mesurées à 10 - 15 cm (prélèvements courants effectués par les praticiens) et considérées comme moyennes à fortes, on observe en effet une réponse toujours linéairement croissante des rendements, ces teneurs s'avèrent donc plutôt faibles au sens agronomique.

Compte tenu des fortes relations quantitatives entre paramètres, liées au contexte physico-chimique par type de substrat affleurant, il est cependant délicat de discuter du déterminisme des rendements par tel ou tel élément considéré isolément.

Dans le cas du haricot, son enracinement moindre et sa sensibilité aux facteurs hydriques occultent fortement la fertilité chimique intrinsèque du substrat, d'autant que notre dispositif occultait en partie un type de matériau dégradé, et que le labour intervient juste avant ce cycle.

Si l'on observe les teneurs moyennes en azote total, phosphore assimilable et potassium échangeable mesurées sur les 80 points à 10 - 15 cm, selon les deux itinéraires de préparation de sol et à deux dates extrêmes (août 1989-novembre 1991) (données relatées sur le tableau III.91.), on remarque que pour ces trois éléments majeurs, l'évolution est différente et dépend du système de culture.

Figure III.91. Evolution des teneurs moyennes (40 points par sous parcelle) en azote total (pour mille), phosphore assimilable (ppm) et potassium échangeable (méq/100g) entre août 1989 et novembre 1991.

		08 / 1989	11 / 1991
AZOTE :	zone labourée	7.28	7.19
	zone non labourée	6.73	7.23
PHOSPHORE	zone labourée	439	356
	zone non labourée	356	315
POTASSE	zone labourée	0.15	0.21
	zone non labourée	0.1	0.31

Statistiquement et compte tenu de la variabilité parcellaire de ces données, seules les teneurs moyennes en phosphore sous labour et en potasse sous travail minimum sont significativement différentes entre les deux dates (au seuil 99%). On observe cependant que :

Pour la potasse, le sol est en régime d'enrichissement (lié aux intrants et aux niveaux très faibles initiaux), plus intense sous travail minimum que sous labour. Pour le phosphore, le sol est en régime d'appauvrissement, modéré sous travail minimum, plus intense sous labour. Pour l'azote, on observe une évolution positive (non significative) sous travail minimum, un maintien de stock sous labour.

Concernant l'évolution de la fertilité chimique des couches superficielles et pour un itinéraire technique identique par ailleurs (apports au sillon de mêmes quantités de fertilisants organiques et minéraux en particulier), le travail minimum du sol (simple sillonnage avant semis) apparaît plus intéressant à moyen terme que le labour, qui occasionne des dilutions en mélangeant des horizons de fertilité contrastée.

3. Caractéristiques édaphiques et fonctionnement des matériels de préparation des andosols cultivés

3.1. Introduction, définition de la méthode

3.1.1. Avant propos : le développement récent d'une approche intégrée

L'impact du travail du sol dans les systèmes de culture et les substrats andiques des zones d'altitude a été abordé selon deux points de vue :

- un point de vue agro-pédologique, pour lequel le sol sous culture est un matériau aux caractéristiques et fonctionnements évolutifs, siège de déformations, sujet à décapage,
- un point de vue agronomique, pour lequel le sol est le substrat de la culture, aux potentialités et à la fertilité évolutives,

Compte tenu des observations faites en matière de comportement des couples outils - cellules motrices lors des opérations de préparation des andosols cultivés, il apparaît intéressant d'aborder le travail du sol sous l'angle agro-machiniste des relations entre substrat et fonctionnement des matériels.

Le développement récent des dispositifs métrologiques embarqués (associés à des capteurs de plus en plus performants fournis par l'industrie) permet aux machinistes d'accéder aisément à divers paramètres de fonctionnement des cellules motrices ou des outils.

Dans ce domaine, le CIRAD-SAR a mis au point et expérimente une chaîne de mesure automatisée dotée de capteurs et d'une centrale d'acquisition programmable permettant d'obtenir en conditions réelles de fonctionnement des données précises et nombreuses et donc d'évaluer les performances des matériels au champ (LAUGROST, 1987 ; GARON, 1990 ; JACQUIN, 1990 ; ADJIRI, 1991).

Objet de nombreux développements et recherches à La Réunion, cette chaîne de mesure a été mise en oeuvre sur diverses cellules motrices et conditions (FOURNIER, 1985 ; LEPETIT, 1989) sans que l'analyse des données recueillies ne prennent en compte l'incidence du milieu physique.

Les relations entre le sol et la machine sont habituellement abordées au plan de l'impact du passage des engins (tassement...) ou des outils de préparation de sol sur l'état physique de l'horizon cultural (point de vue agro-pédologique), soit en une approche analytique des modifications structurales ou de leurs conséquences sur d'autres propriétés (PAPY, 1987 ; KANWAR, 1989 ; HILL, 1990 ; COX et *al.*, 1990 ; BOIFFIN et *al.*, 1990 ; PIKUL et *al.*, 1990 ; ZHAI, 1990 ; SAUER et *al.*, 1990) ; soit en une approche descriptive normalisée (HENIN et *al.*, 1969 ; MANICHON, 1982).

Avec l'apport des techniques métrologiques embarquées, aptes à caractériser le fonctionnement des matériels, une approche intégrée se développe, elle vise à caractériser les états initiaux et finals du sol soumis au travail et à établir le bilan énergétique des opérations de travail du sol, en fonction des états structuraux obtenus (HONG, 1990 ; ALWIS, 1990 ; COULOMB, 1991).

Ces approches visent principalement à relier les performances des matériels aux profils culturels obtenus.

L'étude engagée ici vise à tester un protocole pour évaluer l'incidence des caractéristiques physiques du milieu et des composantes de la réalisation d'un labour sur le fonctionnement de la cellule motrice en conditions réelles de terrain à l'échelle parcellaire.

Le cas de la réalisation d'un labour avec une charrue bisocs HUARD sur andosol est choisi, la cellule motrice est un tracteur MASSEY FERGUSON MF294 (73 ch DIN).

3.1.2. Méthodologie

Une méthodologie est proposée, elle comprend diverses phases parfois concomitantes :

- la caractérisation du milieu physique par prélèvements ponctuels puis cartographie sur l'ensemble de la parcelle ;
- la réalisation du labour avec compilation de paramètres issus de la chaîne de mesure sur des segments identifiés et repérés ;
- l'attribution des paramètres physiques du sol aux segments labourés par interpolation géostatistique (krigeage) ;
- l'analyse explicative des données : mise en relation des données "machine" et des données "sol" sur les segments ; quantification de l'évolution du sol après travail.

Cette méthodologie permet de suivre une parcelle sur plusieurs cycles culturels.

L'essai se situe sur la station expérimentale de Fond Jardin, au cœur du domaine des andosols des Hauts de l'Ouest (RAUNET, 1988), sur le dispositif déjà décrit et utilisé pour d'autres expérimentations.

La parcelle concernée subit une rotation bisannuelle de haricot (de mars à août) et de maïs (de novembre à mars), le labour intervenant avant l'implantation du haricot en mars, en fin de saison des pluies.

3.2. Obtention des données

3.2.1. Les données du milieu physique

Deux jours avant le labour et sur une zone de mesure préalablement définie, les données sont obtenues après prélèvements selon un maillage régulier de 4 x 4 m couvrant les deux sous-parcelles, l'une labourée, l'autre sans préparation de sol. Pour chacun des 80 points du maillage (40 noeuds par sous parcelle), deux profondeurs sont prélevées: 10 - 15 cm et 30 - 35 cm.

Sur l'ensemble des paramètres mesurés et étudiés par ailleurs, seuls sont retenus pour cette étude :

- la teneur en eau volumique θ , significative du type d'horizon affleurant et dont dépend le collage aux pièces travaillantes, le patinage de l'unité motrice ;
- la masse volumique apparente humide γ_w ; c'est la densité du sol en place, permettant de définir la masse de sol déplacé dans les segments labourés, connaissant leur volume.

Les variables retenues par point sont les données de θ et γ_w obtenues à la profondeur de 10 - 15 cm.

Les autres paramètres mesurés se sont avérés trop peu variables sur la sous parcelle labourée pour pouvoir expliquer les comportements du tracteur (indice d'émission MWD et de stabilité structurale S des agrégats, teneur en eau à différents pF).

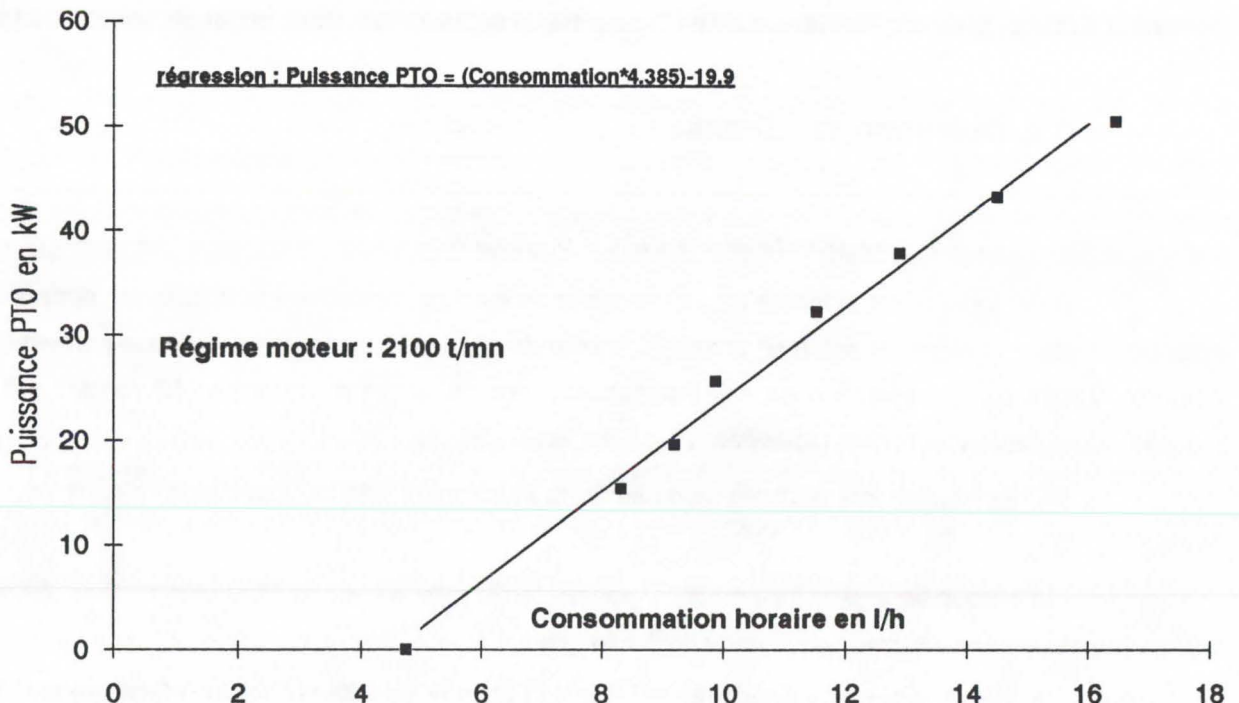
Nous avons pu constater que la distribution des 2 paramètres étudiés sur la sous-parcelle labourée ne présentaient pas de dérive et étaient purement aléatoires (dès le pas minimum choisi $h=4$ m, la semi-variance est atteinte), ou la variance pépétique est telle qu'elle masque toute dépendance spatiale entre mesures proches (cf. chapitre III.1.3.). Cela garantit l'indépendance des points de mesure.

3.2.2. Les données recueillies par la chaîne de mesure embarquée

□ Concept central : la mesure de la puissance

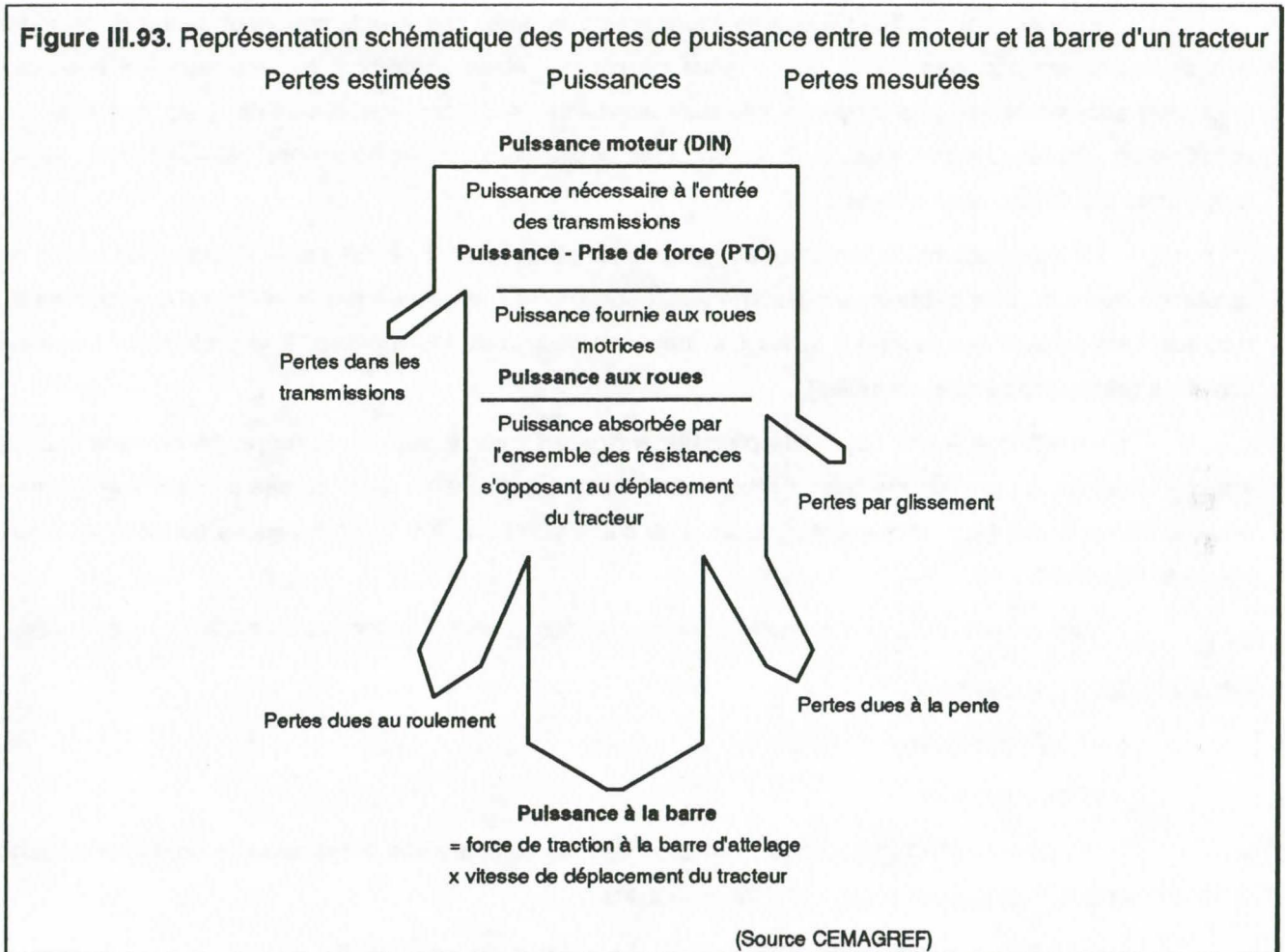
La connaissance des moteurs diesel montre qu'il existe des relations très fiables pour un moteur donné, permettant de déterminer la puissance développée (puissance PTO, prise de force) en fonction du régime et de la consommation. Il suffit donc d'installer les capteurs appropriés sur la cellule motrice à tester (débit-mètre), et d'avoir préalablement établi les courbes-abaques de référence par passage au banc à poste fixe. La figure III.92. relate les couples puissance prise de force / consommation obtenus au banc à un régime moteur de 2100 t/min. Le passage au banc fournit un ensemble de droites par régime.

Figure III.92. Couples puissance - prise de force / consommation obtenus au banc dynamométrique à 2100 t/min., avec le tracteur MASSEY FERGUSON MF294 (73 ch, soit 53.7 kW DIN).



Lors de la réalisation du chantier, la mesure de la consommation associée à la connaissance du régime moteur fournit de façon fiable la puissance développée à la prise de force. Celle-ci représente la puissance du moteur, diminuée des pertes dans les transmissions vers la prise de force, et des pertes hydrauliques.

Cette puissance - prise de force, diminuée des pertes dans les transmissions (boîte de vitesse et ponts, estimées à 5%), constitue la puissance développée aux roues. Les pertes dues au roulement, à la pente, au glissement (pertes mesurées par les capteurs) occasionnent une diminution de la puissance transmise à la barre de traction de l'outil (figure III.93.).



La chaîne de mesure embarquée met en oeuvre 2 types de capteurs : logiques et analogiques (PIROT, 1988; GARON, 1990).

□ Les capteurs logiques

Ce type de capteur envoie des informations de type 0 ou 1 (impulsion), et au moment de la scrutation (toutes les 6 secondes), il comptabilise toutes les impulsions qui ont été émises depuis la dernière observation. Ce sont : un compte-tour (1 impulsion par tour-moteur), un débit-mètre (1 impulsion tous les cm^3) et un radar (1 impulsion tous les 10 mm d'avancement). Les données accessibles sont donc : régime

moteur, consommation (et donc puissance à la prise de force), distance parcourue (et donc vitesse d'avancement).

☐ Les capteurs analogiques

Ces capteurs donnent toutes les 3 secondes la valeur instantanée de la mesure (une variation de courant), sans tenir compte de ce qui s'est passé depuis la dernière scrutation. Ce sont : un inclinomètre qui fournit les valeurs de pente et de dévers (non fonctionnel dans cet essai), un capteur de profondeur (différence de profondeur entre guéret et fond d'enrayure), un capteur d'outil (au travail ou relevé).

☐ Les segments

Pour pouvoir attribuer à des secteurs précis labourés (segments correspondant à 6 secondes d'avancement) les données issues des 2 types de capteur et de scrutation, les données à 6 secondes (logiques) sont associées à la moyenne des trois scrutations à 3 secondes (0s-3s-6s) (ceci constitue une modification importante par rapport à la stratégie jusqu'alors employée : homogénéisation à 3s en moyennant 2 données successives à 6s).

La localisation et la longueur des segments labourés sont définis par le début et les temps de scrutation des différents capteurs sur les enrayures successives, ainsi que par la vitesse d'avancement du tracteur. Leur largeur correspond à la largeur moyenne de travail, leur hauteur à la profondeur moyenne travaillée (parallélépipèdes rectangles).

On attribue à ces segments précisément repérés sur le terrain, la moyenne de vingt valeurs krigées obtenues à partir du maillage, l'interpolation étant indispensable dans ce cas puisque l'on ignore *a priori* la situation des segments avant réalisation du chantier, et que les caractéristiques du matériau avant travail sont recherchées.

40 segments sont ainsi identifiés, sur chacun des quels sont obtenus les paramètres suivants :

Par la métrologie embarquée :

- Régime moteur
- Consommation
- Puissance PTO (prise de force, déterminée par comparaison à des courbes obtenues au banc dynamométrique, connaissant régime et consommation)
- Puissance aux roues (= puissance PTO - pertes transmissions, soit 5%)
- Puissance développée à la barre (= puissance aux roues - pertes [glissement, pente, roulement, transferts])
- Effort de traction à la barre (puissance barre / vitesse)
- Distance parcourue en 6s (longueur du segment ou vitesse)
- Glissement (patinage)
- Profondeur de labour
- Volume de sol retourné (profondeur * largeur de travail * longueur de segment)
- Pente

Par la caractérisation spatiale de l'état initial du sol :

- Masse volumique humide de la couche labourée (10 - 35 cm)
- Masse de sol retourné (volume de sol * masse volumique)
- Teneur en eau volumique à 10 - 15 cm

3.3 Résultats - discussion

3.3.1. Observations générales concernant le travail réalisé

Le travail réalisé lors de l'essai est conforme à l'aspect des labours de sols andiques en altitude : labour arrondi, avec un émiettement important, mais où les sillons sont penchés et marqués. Le rapport largeur / profondeur de travail par corps est en moyenne de l'ordre de 1.6 et de la vitesse moyenne de travail assez élevée (5.8 km/h). L'adhérence de la terre aux pièces travaillantes est cependant limitée (utilisation de versoirs claire-voie). La largeur totale de travail a été très homogène, elle sera assimilée à une constante dans les calculs (0.85 m).

Ce labour a été réalisé en l'absence de "contrôle d'effort" (asservissement automatique de la position de l'outil à l'effort). La position de l'outil, donc la profondeur de travail, était contrôlée par le chauffeur.

Compte tenu des variables disponibles et des conditions de réalisation de l'essai, il apparaît intéressant d'une part de cerner les types de relation entre les différentes variables, d'autre part d'expliquer 2 variables de fonctionnement du tracteur, la puissance aux roues (calculée à partir de la consommation, du régime moteur et des pertes dues aux transmissions) et le glissement, par des variables d'état teneur en eau et masse volumique humide du sol, profondeur de labour, masse de sol déplacée, pente.

L'ensemble des données recueillies est relaté dans le tableau III.94.

3.3.2. Tableau de données et paramètres statistiques

☐ Données sol

Elles sont très homogènes sur l'ensemble des segments (C.V. faibles). On notera la teneur en eau moyenne assez élevée ($\theta=46.5\%$, soit près de 70% d'humidité pondérale W), caractéristique du milieu andique et liée à la saison (mars). La masse volumique humide moyenne est faible et correspond aux types d'horizons affleurants : Aa ou Sa.

Les pentes relevées sont variables et importantes, alors que la parcelle est globalement plane. La fiabilité de ces mesures est incertaine dans le cadre de l'essai comme le montrera l'analyse des données.

☐ Données tracteur

La distance parcourue en 6 sec. (= longueur des segments) est très stable, proche de 9.8 m (soit 1.6 m/s ou 5.8 km/h, vitesse élevée pour un labour).

Cette vitesse est liée au régime moteur, maintenu très peu variable (tracteur MF294, rapport de boîte: 2M)

Les autres paramètres de fonctionnement du tracteur sont en général très variables (C.V. > 10%) : la consommation moyenne est proche de 13 l/h, la puissance aux roues de 36 kW (surestimée d'environ 9% puisque évaluée après passage au banc à 100 m d'altitude, l'essai se situant à 1 000 m). La puissance développée à la barre est en moyenne de 26.5 kW. Rappelons que la puissance du tracteur utilisé, moteur équipé (DIN), est de 53.7 kW.

La puissance aux roues moyenne, corrigée de l'altitude, peut être estimée à 32.9 kW pour une profondeur de labour de 23 cm en moyenne. Une étude du CNEEMA (GUIMONT, 1980) estime entre 20 et 26 kW, la puissance aux roues nécessaire pour effectuer un labour à 20 - 30 cm, en conditions de sol de 25 à 45% d'argile.

La puissance à la barre moyenne (calculée à partir de la puissance aux roues corrigée des pertes mesurées) est de 24.2 kW. D'après une autre étude du CNEEMA (BILLOT cité par DALLEINNE, 1979), un labour réalisé dans de telles conditions nécessite une puissance à la barre d'environ 19 kW. La littérature signale des besoins en puissance nominale de l'ordre de 20 à 30 kW pour un labour réalisé à 25 cm avec une charrue bisoc (Anonyme, 1991).

Un système américain (BOWERS, 1977) utilise un coefficient multiplicatif de 0.86 intervenant en cascade entre différentes puissances depuis la puissance maximale du tracteur, puis à la prise de force, et jusqu'à la puissance utilisable à la barre sur différents types de matériaux (sans indication de profondeur), ces calculs appliqués à la puissance maximale à la prise de force du tracteur MF294 donnent des valeurs de puissance à la barre de l'ordre de 23.9kW sur sol mou, 27.8kW sur sol labouré, 32.3kW sur sol ferme.

Soulignons ici l'absence de références plus précises en la matière. L'apport de techniques métrologiques nouvelles, telles que le système embarqué utilisé ici, est essentiel.

Le glissement moyen est faible (plus de 9%), c'est cependant le paramètre le plus variable (C.V. de près de 21%).

□ Données outil

La profondeur de travail moyenne enregistrée est de 23 cm, ce paramètre est variable (C.V. > 13%) et constitue le principal facteur de variabilité de la masse de sol déplacé puisque longueur des segments et masse volumique du sol sont très homogènes, la largeur est une constante.

L'effort de traction moyen (calculé à partir de la puissance à la barre et de la vitesse) est de 16.3 kN pour une largeur de travail de 0.85 m, soit 19.2 kN par mètre de largeur. BOWERS (1977) indique une résistance du sol de 7 kN/m pour un sol sableux, 14 kN/m pour un sol moyen, 22 kN/m pour un sol lourd. Le CNEEMA donne un effort de traction de 14 kN par m de largeur travaillée, à une profondeur de 20cm en sol moyen limoneux.

Figure III.94. Données attribuées à chaque segment travaillé, relatives au sol et au matériel.

Segment	Eau vol. %	M. vol. hum	Prof.	Volume	Distance	Masse	Glissmt	Pt moy	Régime	Conso.	Puis. r	Puis. b	Effort b.
1	44.02	1.12	0.226	1.83	9.54	2055	8.41	-1.8	2030	10.8	31.07	23.93	15.05
2	49.74	1.1	0.267	2.13	9.37	2333	8.8	-0.77	2030	10.8	31.07	21.91	14.03
3	43.62	1.12	0.219	1.74	9.32	1938	9.65	-0.03	1970	12.6	39.7	32.19	20.72
4	48.96	1.11	0.234	1.79	9.01	1996	8.9	-2.94	1980	12	36.93	28.43	18.93
5	48.83	1.12	0.242	1.95	9.46	2176	10.96	1.71	2070	15	45.87	32.29	20.48
6	49.33	1.07	0.218	1.73	9.31	1851	10.82	-0.26	2080	14.4	43.41	31.13	20.06
7	44.37	1.12	0.255	2.22	10.26	2495	8.62	-0.89	2160	14.4	38.73	31.53	18.44
8	50.22	1.08	0.231	1.96	10	2129	8	-1.94	2180	11.4	30.02	21.87	13.12
9	43.31	1.11	0.21	1.72	9.66	1921	7.37	0.4	2020	11.4	33.47	25.17	15.63
10	48.95	1.12	0.228	1.83	9.43	2038	8.02	-0.95	2030	10.8	31.07	22.22	14.14
11	42.71	1.09	0.252	2.06	9.6	2235	10.66	-1.12	2090	13.8	41.24	31.02	19.39
12	49.07	1.14	0.22	1.78	9.5	2022	8.07	-2.08	2100	11.4	31.54	23.75	15
13	43.06	1.11	0.203	1.73	10.03	1920	6.2	-0.75	2100	13.2	38.27	29.41	17.59
14	48.74	1.12	0.199	1.68	9.95	1885	7.15	-1.37	2130	10.2	26.35	18.74	11.3
15	51.68	1.26	0.233	1.95	9.83	2449	11.48	-2	2100	13.2	38.27	30.16	18.41
16	42.82	1.1	0.198	1.73	10.28	1910	8.31	-0.94	2170	12.6	33.98	26.8	15.64
17	48.84	1.12	0.21	1.79	10.03	2003	8.91	-0.8	2180	11.4	30.02	20.53	12.28
18	50.54	1.25	0.252	2.12	9.91	2647	11.92	0.16	2160	13.8	37.25	26.11	15.81
19	42.43	1.1	0.226	1.93	10.06	2119	7.7	-0.83	2160	13.8	37.25	27.48	16.39
20	49.12	1.12	0.241	2.07	10.08	2307	7.58	-1.61	2170	12	32.12	23.5	13.99
21	47.77	1.22	0.321	2.69	9.87	3283	13.52	-0.45	2090	15	45.11	34.13	20.75
22	42.47	1.09	0.218	1.9	10.26	2074	10.27	-1.8	2160	15	40.12	31.7	18.54
23	49.04	1.13	0.234	1.95	9.82	2203	8.38	-2.2	2150	15	40.89	30.69	18.75
24	46.23	1.19	0.239	2.01	9.9	2399	9.01	0.2	2130	13.2	37.02	22.64	13.72
25	48.82	1.15	0.226	1.84	9.55	2116	11.74	-1.5	2160	13.8	37.25	23.86	14.99
26	44.55	1.15	0.224	1.88	9.89	2171	7.58	1.5	2140	12	32.84	23.9	14.5
27	43.57	1.09	0.212	1.72	9.55	1876	12.06	-3.56	2150	15.6	42.34	31.69	19.91
28	48.53	1.17	0.29	2.34	9.5	2728	11.9	-2.61	2110	14.4	42.08	32.06	20.25
29	43.76	1.14	0.218	1.77	9.55	2011	6.65	-0.8	2140	13.2	36.6	23.54	14.79
30	44.47	1.1	0.214	1.79	9.82	1968	8.31	-4.01	2170	12	32.12	21.69	13.25
31	48.15	1.18	0.183	1.56	10.01	1829	9.4	-1.42	2170	12	32.12	23.26	13.94
32	42.51	1.12	0.179	1.52	10.01	1700	6.12	-2.08	2170	12	32.12	22.06	13.22
33	45.67	1.12	0.203	1.59	9.22	1780	8.58	-4.87	2120	12	33.32	20.88	13.59
34	47.11	1.16	0.269	2.23	9.74	2592	9.89	-2.12	2120	13.2	37.43	29.11	17.93
35	43.36	1.13	0.234	1.93	9.71	2188	7.08	-3.95	2120	12.6	35.45	27.21	16.81
36	47.52	1.15	0.192	1.63	10	1880	9.9	-2.6	2160	12.6	34.27	22.2	13.32
37	46.2	1.16	0.217	1.82	9.85	2106	8.62	-1.84	2160	13.2	35.76	28.6	17.42
38	43.46	1.14	0.193	1.65	10.03	1879	5.17	-2.74	2140	12	32.84	22.2	13.28
39	50.56	1.21	0.245	2.09	10.03	2517	11.37	-2.54	2160	14.4	38.73	26.93	16.11
40	44.36	1.13	0.303	2.47	9.6	2781	11.34	-2.27	2110	14.4	42.08	33.57	20.98
Moyen.	46.46	1.14	0.23	1.9	9.76	2162.75	9.11	-1.51	2118.5	12.92	36.2	26.5	16.31
Ec.type	2.87	0.04	0.03	0.25	0.3	324.43	1.91		55.31	1.4	4.59	4.31	2.77
Coef. va.	6.18	3.51	13.04	13.16	3.07	15	20.97		2.61	10.84	12.68	16.26	16.98

* Unités (Origine):

- * Teneur en eau volumique % (krigeage)
- * Masse volumique humide en g/cm3 (krigeage)
- * Profondeur de labour en cm (chaîne de mesure)
- * Volume en m3 (profondeur*distance*largeur de travail)
- * Distance parcourue en 6s= longueur du segment en m (chaîne de mesure)
- * Masse de sol déplacée en kg (volume*masse volumique)

- * Glissement=patinage en % (chaîne de mesure)
- * Pente moyenne en degré (chaîne de mesure)
- * Consommation (en l/h) (chaîne de mesure)
- * Régime moteur (en t/min.) (chaîne de mesure)
- * Puissance aux roues (en kW)= (consommation+régime moteur+banc dynamo)
- * Effort de traction à la barre (en kN) (puiss.barre / vitesse)

3.3.3. Etude de l'échantillonnage et analyse multivariable

□ Analyse en Composantes Principales

Après réalisation d'une A.C.P. , on constate que les individus (les 40 segments) sont répartis de façon homogène sur les 2 axes principaux, et ne sont pas associés spatialement en fonction de leur localisation sur le terrain (mises à part quelques exceptions). Ceci est important et n'était pas acquis *a priori* puisque 2 ou 3 segments localisés sur une même raie de labour pouvaient avoir des caractéristiques proches (principalement par un comportement du chauffeur par enrayure : contrôle de position, régime moteur, vitesse...) (voir annexes).

□ Analyse factorielle des correspondances multiples

Afin de discerner les liaisons de nature diverses entre les variables mesurées, celles ci sont découpées en modalités hiérarchisées (3 en général) et soumis à une A.F.C.M., après établissement de tableaux de Burt. Cette approche descriptive qualitative présente l'avantage de ne pas préjuger des interactions entre variables, en particulier de s'affranchir dans un premier temps d'éventuelles relations causales ou déterministes, plus difficiles à appréhender. Elle permet en outre de souligner une relation entre variables, par modalités et non pas sur l'ensemble de la gamme de variation.

Le tableau de Burt (voir annexes) souligne les relations entre plusieurs variables, relations naturelles liées aux modes de calcul (puissances-effort-consommation...), mais surtout relations fonctionnelles. Le calcul des χ^2 de contingence permet en particulier de rejeter l'hypothèse d'indépendance entre :

- consommation et profondeur travaillée (avec une probabilité de plus de 95%),
- consommation et glissement ($P > 99\%$).

Des familles de segments labourés sont disposées sur le plan factoriel formé par les 2 axes principaux en fonction des différentes modalités des variables (voir annexes). Les résultats obtenus attestent de l'absence de relations simples entre les différents paramètres mesurés mais permettent d'évaluer les proximités objectives entre modalités.

Sur l'ensemble des segments, on observe que :

- une forte consommation est liée à un glissement élevé, une pente positive, un travail profond; les consommations moyennes et faibles ne sont clairement liées à aucun facteur. Seule la puissance aux roues est liée sur toute la gamme (*a fortiori* par le calcul) ;

- un glissement élevé est lié à un travail profond, une masse volumique humide élevée, une forte puissance développée aux roues, une pente positive ;

- un glissement moyen est lié à une teneur en eau moyenne, une profondeur intermédiaire, une pente nulle ou légèrement négative ;

- un glissement faible est lié à une teneur en eau faible, à un travail superficiel;

On notera que seule la profondeur de travail (et la masse de sol déplacé) semble lié au glissement sur toute la gamme des contingences, que le régime moteur très peu variable (1970 à 2180 t/min.), n'est pas déterminant sur la consommation.

3.3.4. Régressions simples et multiples

L'analyse multivariable a montré qu'il n'existait pas de relations simples entre variables, quelques corrélations peuvent être envisagées cependant, seules les corrélations significatives sont présentées.

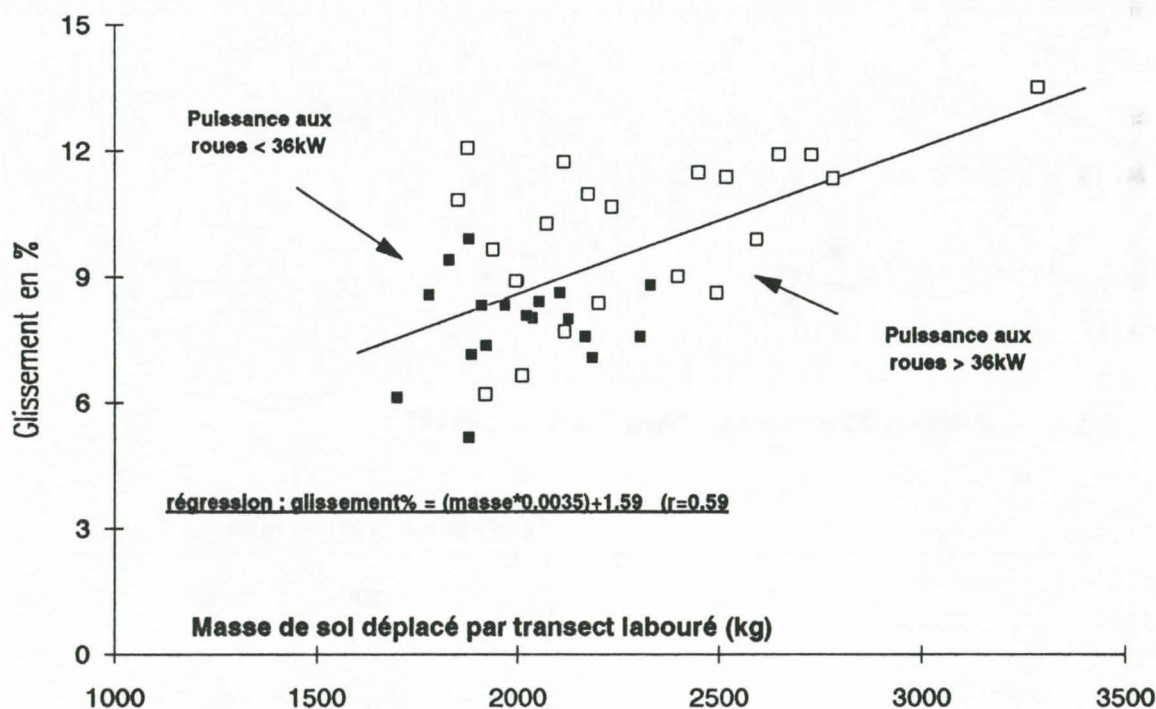
□ Le glissement

Modèles linéaires simples

Des modèles linéaires simples expliquent une part non négligeable du glissement ($r^2 \times 100$ = pourcentage d'explication de la variance totale; signification = probabilité de rejet %) :

- Masse de sol déplacé: 35% de variance expliquée; 0.01% (figure III.95.)
- Profondeur de labour: 34.2%; 0.01%

Figure III.95. Expression du glissement du tracteur en fonction de la masse de sol déplacé par segment labouré (selon deux modalités de puissance aux roues : < 36 kW et > 36 kW)



On notera la cohérence de ces modèles qui proposent des ordonnées à l'origine proche de 0 (pas de glissement si ces variables explicatives sont nulles).

- Masse volumique de la couche labourée: 16.8%; 0.86%

- Teneur en eau du sol à -10cm: 15.2%; 1.24%

Les paramètres d'état du milieu physique, s'ils ne sont pas prépondérants, ont une incidence direct non négligeable sur le glissement de l'unité motrice.

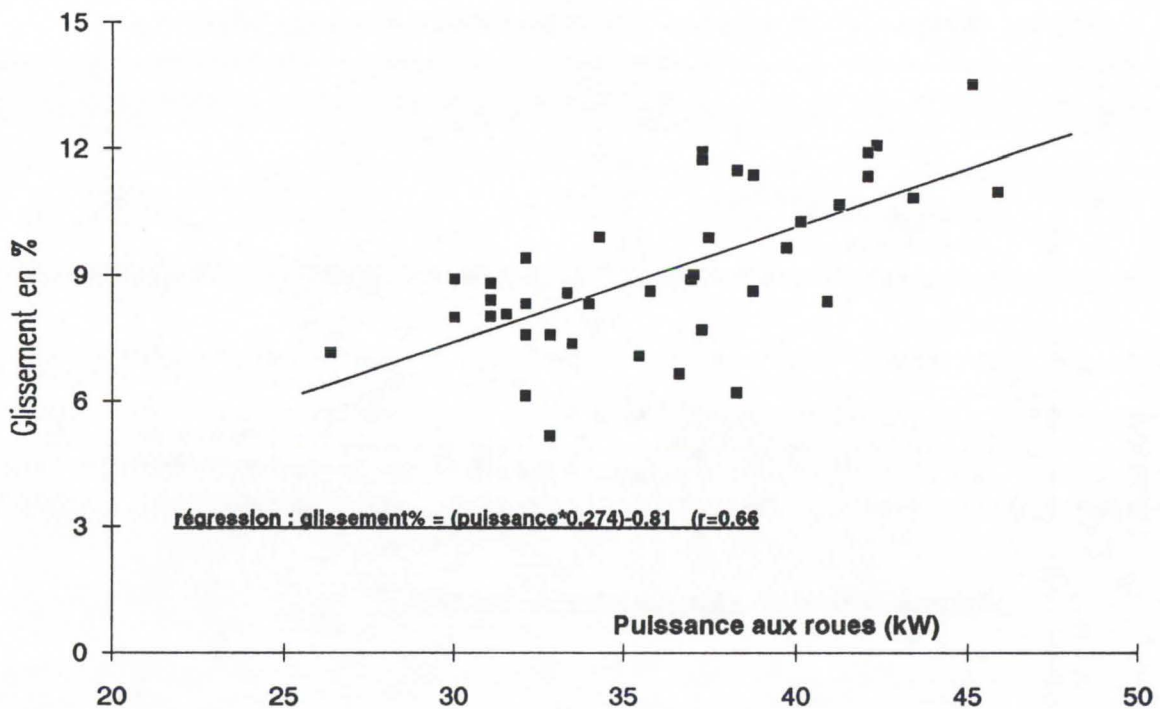
- Puissance aux roues: 43.7%; 0% (figure III.96.)

C'est le paramètre qui est le plus déterminant pour le glissement. L'interprétation des relations entre ces 2 données reste cependant complexe: les risques d'autocorrélation sont importants car elles sont toutes deux dépendantes de la masse de sol déplacé qui sollicite l'effort du tracteur tout en induisant un patinage. Il ne s'agit donc en aucun cas de relations causales ou déterministes simples.

Modèles linéaires multivariables

Par combinaison linéaire de plusieurs variables, la part de variance de glissement expliquée peut être augmentée : la teneur en eau et la masse volumique humide du sol, la profondeur de labour et la pente combinées permettent d'expliquer 42.9%. Si on y joint la puissance aux roues, on atteint 66.2%.

Figure III.96. Expression du glissement du tracteur en fonction de la puissance développée aux roues sur chaque segment labouré



Remarques

Les processus de patinage des cellules motrices liés à la puissance développée ou à des conditions de substrat ne peuvent en aucun cas être approchés par des modèles linéaires (HONG, 1990 ; ADJIRI, 1991). Dans le cadre de cette étude, les gammes de variation peu étendues des variables

explicatives, liées à une mise en oeuvre du matériel dans des conditions homogènes, permettent cette approximation.

On notera que la pente ne permet pas d'expliquer le glissement, malgré une large gamme pour les deux variables.

□ La puissance aux roues

Modèles linéaires simples

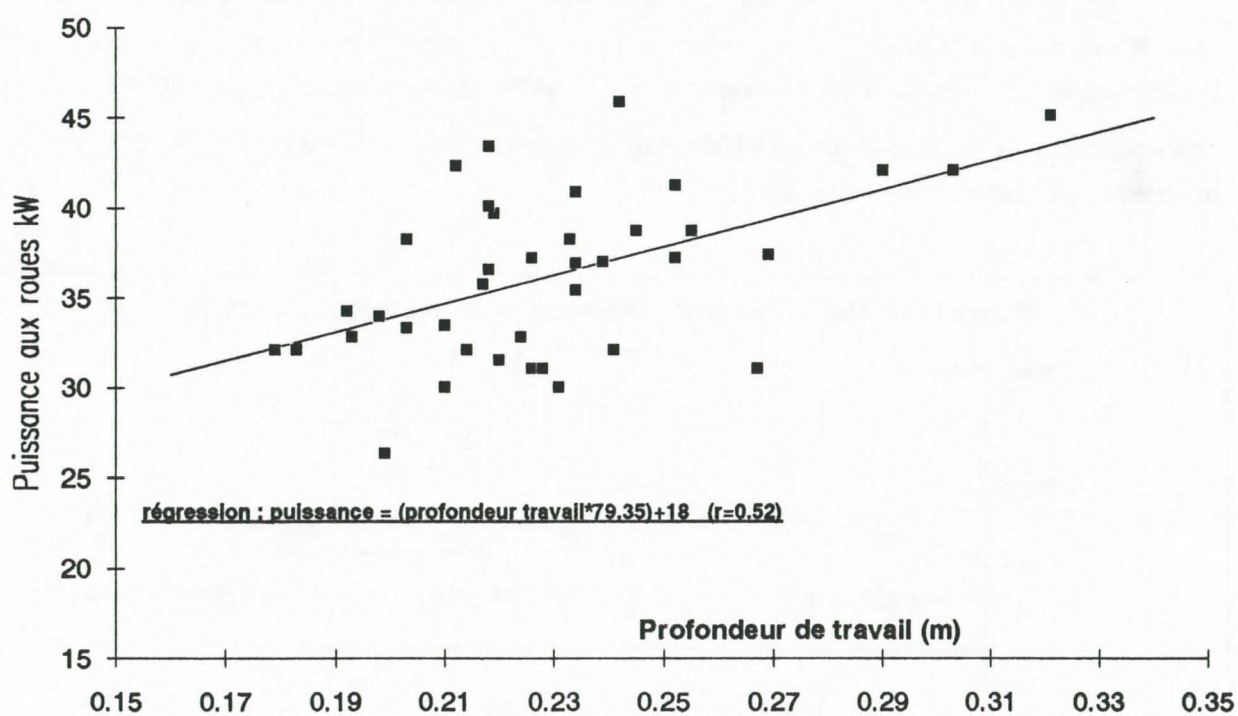
L'application de modèles linéaires à partir des données disponibles ne permet d'expliquer que très partiellement la puissance aux roues de l'unité motrice :

- Profondeur de labour : 27.3% de variance expliquée ; 0.06% (Figure III.97.)
- Masse de sol déplacé : 22.3%; 0.22%

La pente, le régime moteur, la masse volumique et la teneur en eau du sol ne peuvent expliquer séparément aucune part de variance de la puissance.

Sur un milieu identique mais avec des pentes plus contrastées et peut être plus fiables, GARON (1990) a pu montrer une relation nette entre pente et puissance aux roues.

Figure III.97. Expression de la puissance développée aux roues en fonction de la profondeur de travail moyenne sur chaque segment labouré



Modèle linéaires multivariables

La combinaison linéaire associant teneur en eau, masse volumique, pente et profondeur, n'explique que 32.6% des variations de puissance.

Remarque

On notera la forte corrélation linéaire entre puissance aux roues et consommation ($r=0.92$), ce qui est normal compte tenu du régime moteur peu variable et du rapport unique de boîte de vitesse utilisé lors de l'essai.

□ La consommation

Des modèles linéaires simples expliquent mal la consommation du tracteur, il est à noter que 3 modèles proposent des ordonnées à l'origine proches :

Masse de sol déplacé: 8.76

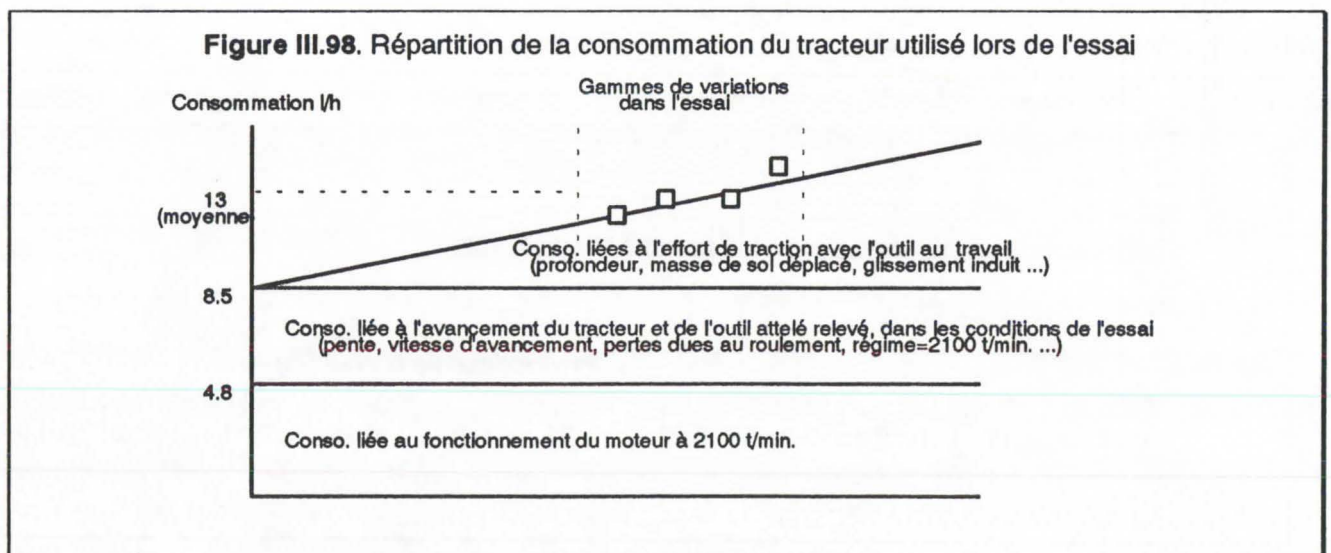
Profondeur de labour: 8.46

Glissement: 8.71

Ces ordonnées à l'origine (8.5 à 8.7 l/h) pourraient correspondre à la consommation du tracteur sans effort de traction (outil relevé), toutes autres conditions étant égales (vitesse, régime, déplacement sur le sol...). On notera que les mêmes variables explicatives, corrélées à la puissance aux roues, donnent des ordonnées à l'origine de l'ordre de 18 à 21 kW, soit 19 à 22 kW PTO (prise de force). La courbe (consommation / puissance PTO) de passage au banc à 2100t/mn confirme cette correspondance, aux pertes dues à la pente et surtout au roulement près (figure III.92.).

Ces résultats permettent de quantifier grossièrement la consommation de carburant directement liée à la réalisation du travail du sol. On peut fractionner la consommation horaire globale du matériel utilisé, dans les conditions données (pente, vitesse, régime moteur ...) (figure III.98.) :

- consommation de base du moteur à 2100 t/min. et à puissance développée PTO nulle : 4.8 l/h (déterminée par passage au banc (voir figure III.92.) ;



- consommation de fonctionnement en déplacement sur le champs, outil relevé : 3.7 - 3.9 l/h,

- consommation liée à la traction de l'outil au travail : 4.3 - 4.5 l/h, en moyenne et dépendant des pertes et contraintes associées (glissement, profondeur de travail ...).

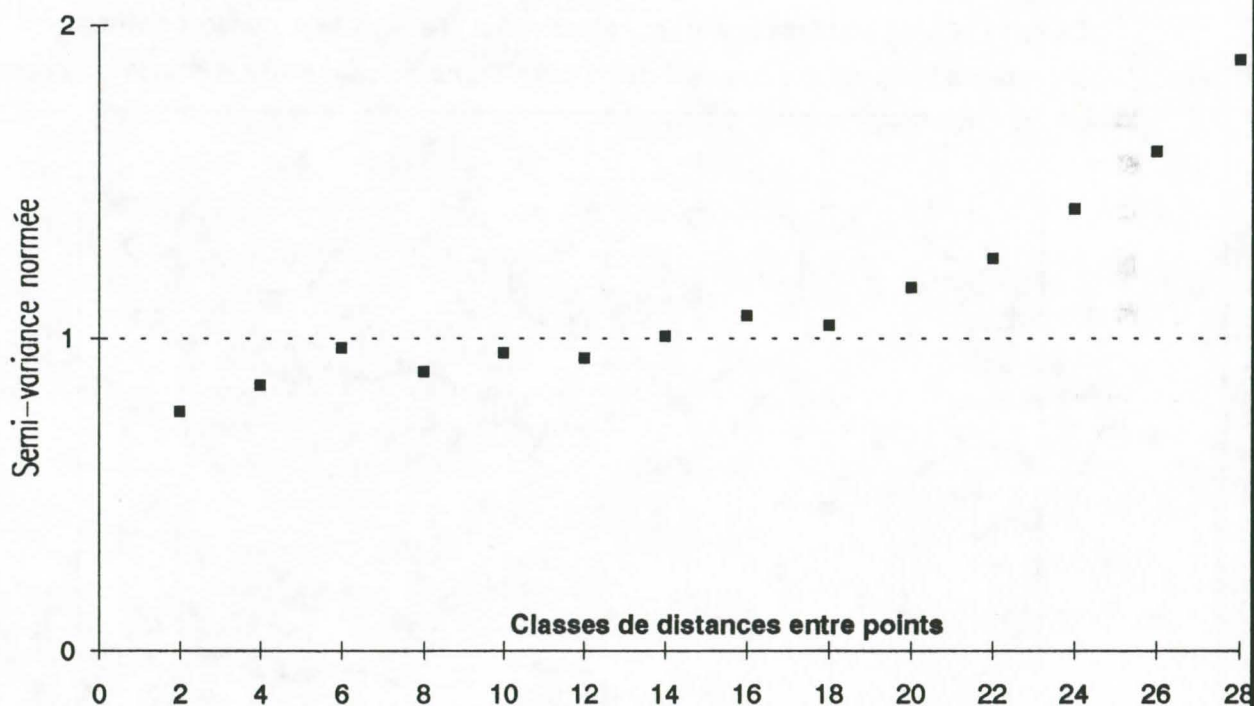
3.4. Etudes connexes

3.4.1. La profondeur de travail : quantification, variabilité spatiale et déterminismes

□ Structure de variabilité

Si la distribution des valeurs de profondeur de travail semble correspondre à une loi normale, ces valeurs sont cependant très dispersées autour d'une moyenne de 24.02 cm : l'écart-type est de 5.74cm, le coefficient de variation de 23.9%.

Figure III.99. Semi-variogramme normé de la profondeur de travail, mesurée sur 139 points lors de la réalisation du labour
(capteur analogique, scrutations toutes les 3 secondes, repérées dans l'espace parcellaire).

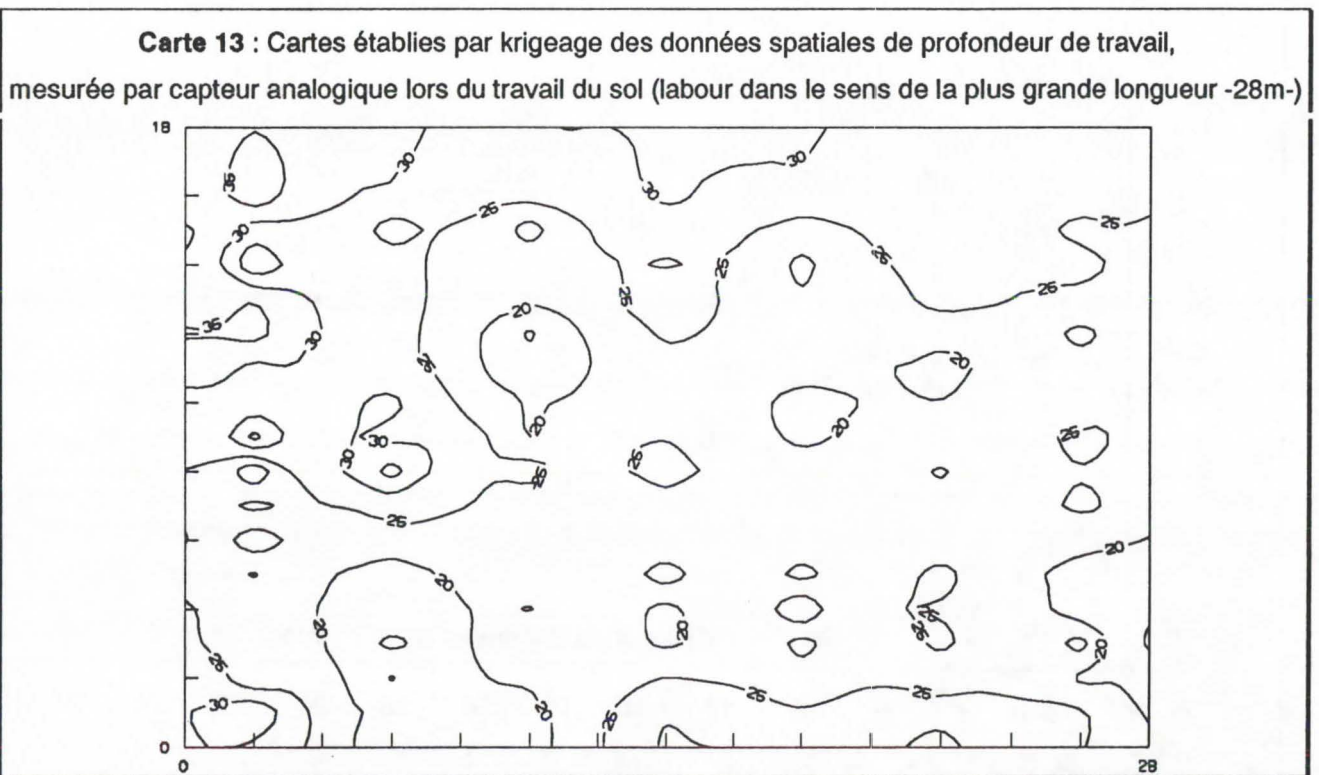


L'établissement du variogramme pour cette variable est réalisé à partir des données brutes issues des scrutations du capteur analogique de profondeur (cadencé à 3 secondes) et repérées dans l'espace parcellaire (figure III.99.). Ce variogramme souligne une structure de variabilité aléatoire (proche de la variance) dès un pas de l'ordre de 6m entre mesure. Cependant, au delà de mesures distantes de 20m,

on note une dérive des semi-variances des couples. Cette distance, possible uniquement selon le plus grand axe de la zone labourée (sens du travail) ; et l'étude des variogrammes directionnels, indiquent que la nature aléatoire de la répartition des profondeurs de travail est limitée dans l'espace, et qu'au delà, des facteurs morphologiques (pente, dévers) et/ou édaphiques (type d'horizon affleurant) gouvernent la profondeur atteinte par les outils. Le variogramme établi perpendiculairement au sens de travail présente une structure rapidement et durablement linéaire, calée sur la variance, confirmant d'une part l'homogénéité de comportement de l'ensemble tracteur-outil entre enrayure, et d'autre part la nature de la dérive révélée dans le variogramme multidirectionnel.

□ Cartographie de la profondeur de travail

Une carte établie par krigeage permet de visualiser dans l'espace parcellaire la répartition de la profondeur travaillée lors du labour (carte 13). Cette imagerie en souligne l'hétérogénéité, et indique que, malgré l'absence de liaison nette entre les variables pente et profondeur travaillée des segments (rappelons que l'inclinomètre semblait défaillant lors de l'essai), la zone où la profondeur de travail est la plus importante (secteur supérieur gauche de la carte 13) correspond à la zone de plus forte pente positive par rapport à l'avancement du couple tracteur-outil : lors de l'essai, la charrue a pénétré plus profondément alors que le tracteur gravissait cette zone (au delà de 30 cm).



3.4.2. Etats initiaux et finals du substrat labouré

Les variables caractéristiques du substrat ont été traitées pour expliquer les comportements du matériel au travail. Ces variables ont évolué après l'opération, témoignant de l'action des outils.

□ Cartographies des données krigées

Des cartes établies par krigeage permettent de visualiser dans l'espace parcellaire la répartition des paramètres édaphiques à l'état initial (avant labour) et à l'état final (après labour) (Cartes 14-15-16-17). Concernant les paramètres physiques utilisés pour expliquer le comportement des matériels, γ_d et θ , cette imagerie complète les paramètres statistiques globaux en soulignant que :

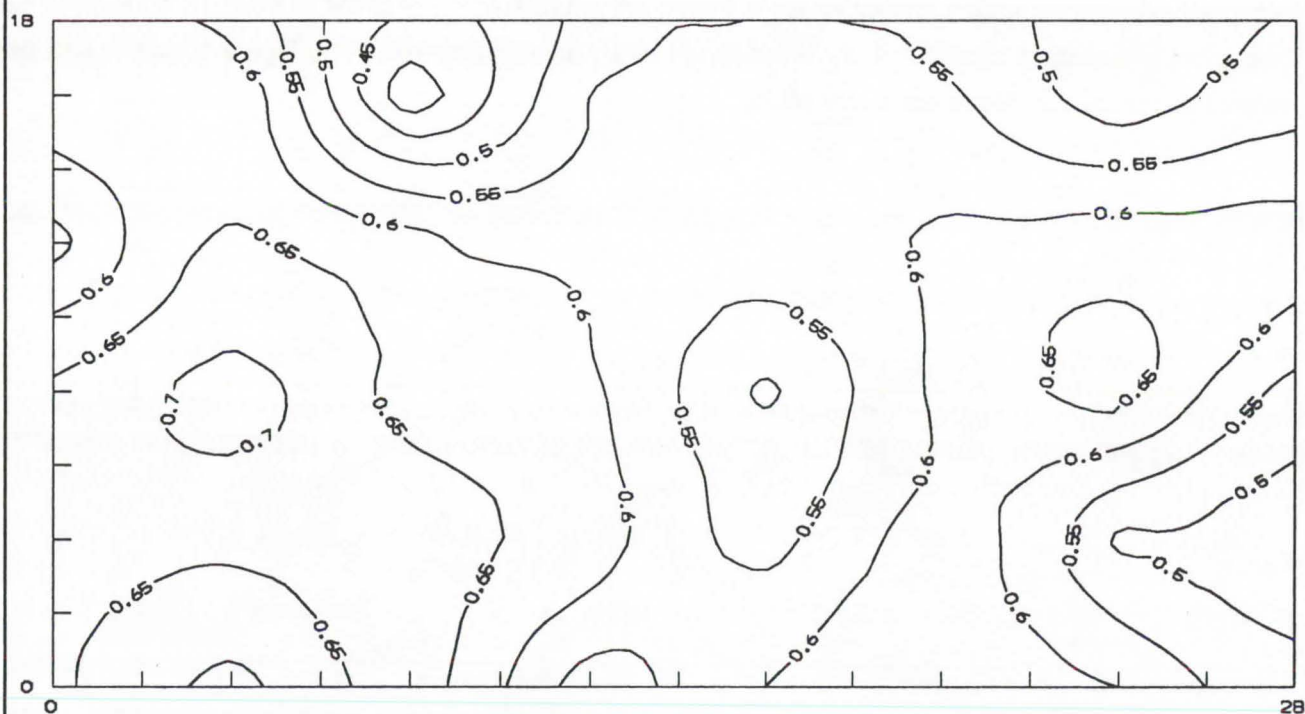
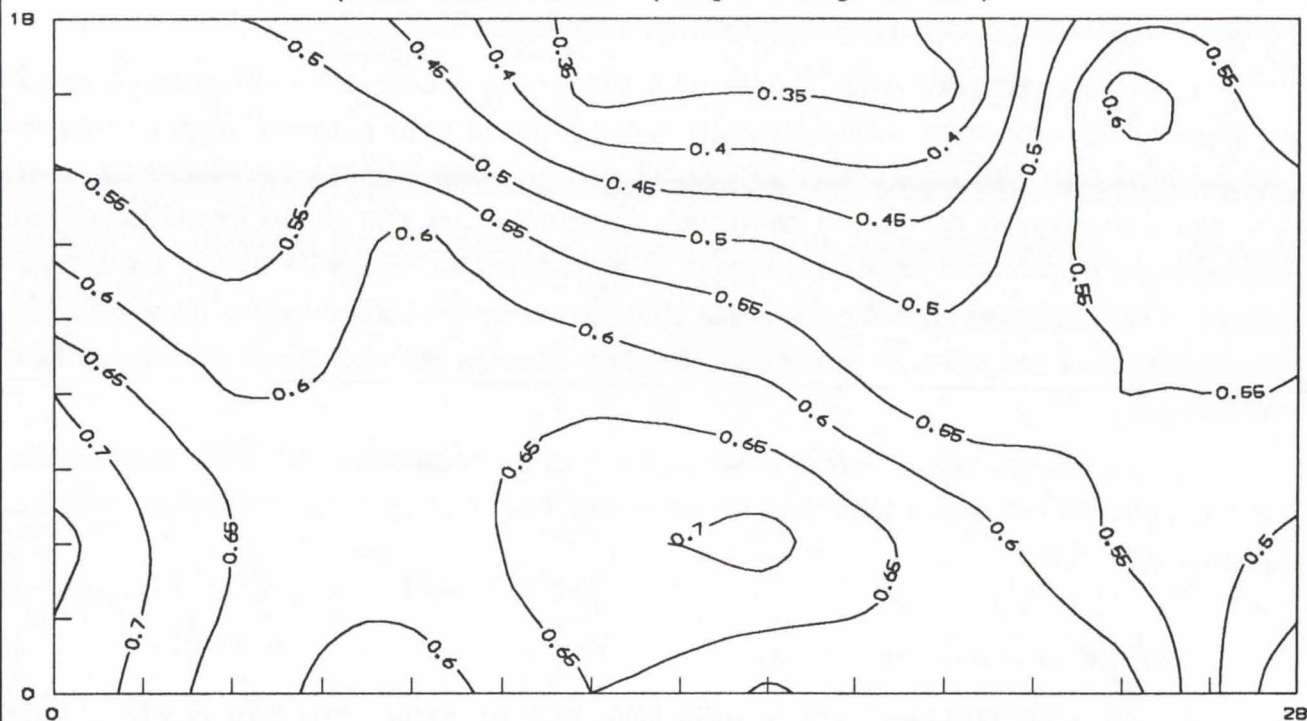
- la répartition des valeurs de masse volumique mesurée à 10 - 15 cm est fortement modifiée, les zones de faibles masses volumiques après travail semblent correspondre à celles de plus forte profondeur travaillée, indiquant que l'évolution de la densité sous labour répond plus au mélange d'horizon et à la mise à l'affleurement de matériau Sa de faible masse volumique, qu'à un réel ameublissement d'un substrat fortement poreux (d'autant de la mesure de la densité γ_d au cylindre de 100 cm³ est délicate et erronée en sol fraîchement travaillé : tassements, réduction-artefact de la macroporosité...) ; pour confirmer cela, on notera une homogénéisation et la disparition de secteurs de très faible masse volumique (mélange des horizons) ;

- la répartition des valeurs de teneur en eau n'est pas bouleversée, mais on constate une nette diminution générale des valeurs, témoignant de l'effet desséchant immédiat du labour, à pas de temps court (cf. chapitre III.1.3.2.).

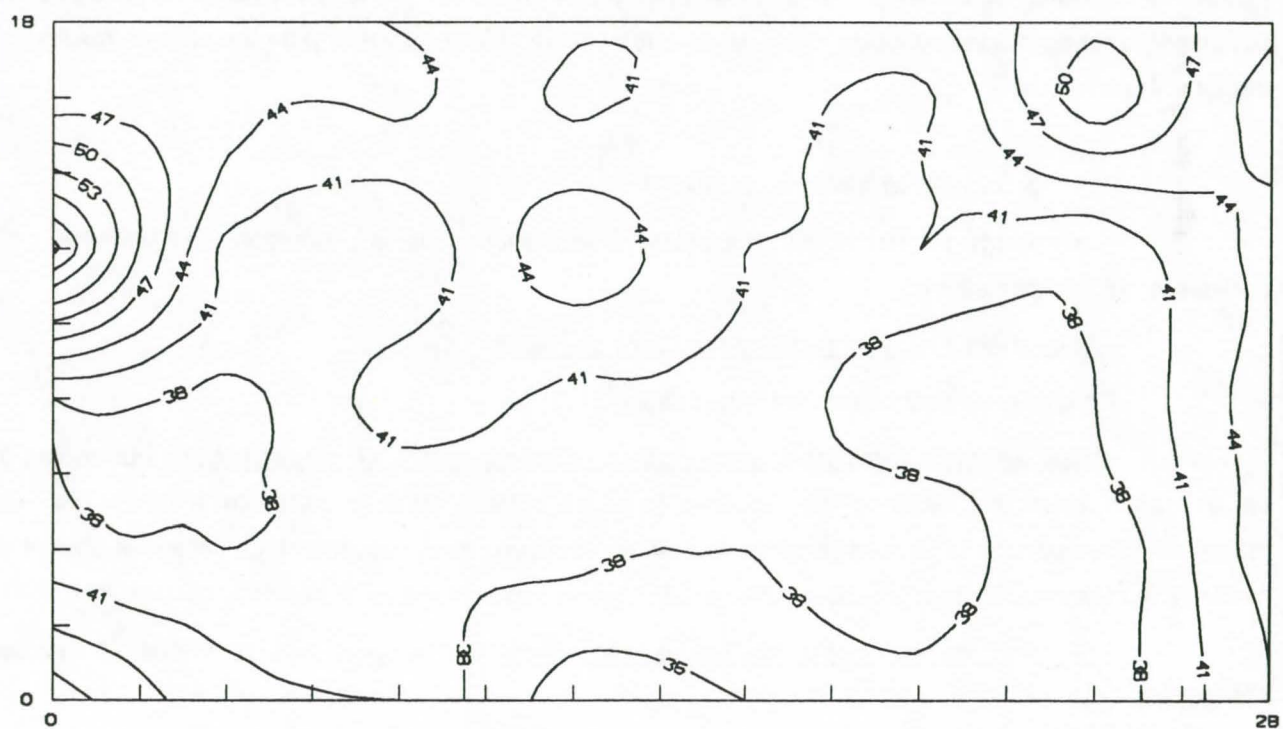
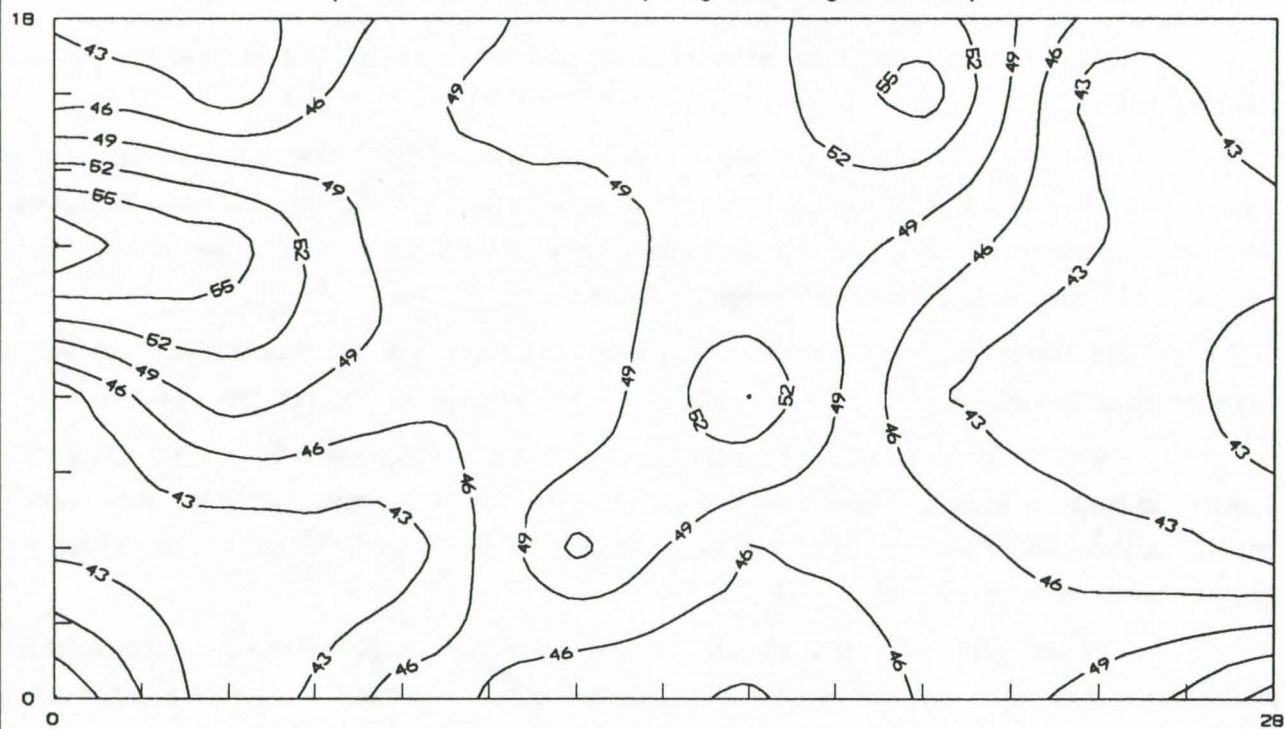
□ Paramètres statistiques

Les paramètres statistiques -moyenne et variance- correspondants aux données brutes issues des prélèvements en maillage avant et après travail ont été relatés au chapitre III.1.3.3. Ils confirment ces tendances : diminution significative de la teneur en eau volumique après travail, légère augmentation des valeurs de masse volumique apparente sèche.

Cartes 14-15. Cartes établies par krigeage des données spatiales parcellaires
de masse volumique apparente γ_d , mesurée par gravimétrie au cylindre avant puis après travail du sol
(labour dans le sens de la plus grande longueur -28m-)



Cartes 16-17. Cartes établies par krigeage des données spatiales parcellaires
de teneur en eau volumique 0%, mesurée par gravimétrie au cylindre avant puis après travail du sol
(labour dans le sens de la plus grande longueur -28m-)



3.5. Conclusion

3.5.1. Méthodologie

Cet essai nous a permis de tester une méthodologie originale d'étude des relations sol / unité motrice / outil.

Les données relatives au sol sont valorisées par l'utilisation d'outils statistiques adaptés, aptes à traiter des informations spatialisées, à les mettre en relation avec les données machine. Les variables d'état retenues pour modéliser le fonctionnements des matériels étudiées ne sont cependant pas pertinentes pour décrire le milieu dans ses potentialités agronomiques.

L'obtention des données relatives au tracteur et à l'outil peut être plus précise : multiplication des scrutations analogiques, amélioration de la fiabilité de certains capteurs (inclinomètre en particulier).

La méthode est au point et semble bien adaptée au vu des résultats obtenus. Cette étude constitue la première étape d'un ensemble cohérent : de nouveaux prélèvements selon le même dispositif ont été effectués après le labour, l'impact du travail du sol peut donc être évalué par l'étude de l'évolution des paramètres du milieu depuis l'état initial.

Dans le cadre de cet essai, d'autres données concernant la couche à labourer auraient été très intéressantes pour mieux expliquer les comportements de l'outil et du tracteur : résistance à la pénétration (incidence sur l'effort de traction), résistance au cisaillement (incidence sur le glissement). Pénétrométrie et scissométrie de terrain peuvent être mises en oeuvre selon le même dispositif pour les obtenir (maillage et traitement statistique).

3.5.2. Le labour sur andosol

Nous avons pu cerner les principales caractéristiques de la réalisation d'un labour sur sol andique à l'échelle parcellaire :

- Glissement peu élevé dans les conditions de l'essai

Ce glissement est cependant très variable.

- Implication non négligeable des conditions édaphiques dans ce glissement : teneur en eau du sol et masse volumique de la couche labourée (prise en compte dans le calcul de la masse de terre retournée). En revanche la gamme de pente de l'essai n'explique pas le glissement. Le collage important de matériau sur les versoirs peut provoquer un effort de traction supplémentaire induisant le glissement.

- Surcroît de puissance aux roues nécessaire par rapport aux références françaises (CNEEMA).

- Puissance à la barre et effort de traction plus importants que les valeurs indiquées par le CNEEMA (de 20 à 25%), ils semblent cependant compatibles avec la résistance d'un matériau lourd de type argileux.

Les pertes de puissance occasionnée par le glissement, le roulement (microrelief, thixotropie) et la pente occasionnent des différences importantes et très variables entre puissance aux roues et puissance

à la barre (dans le cadre de l'essai, cette différence est en moyenne de 27%, avec des écarts extrêmes de 18.5% à 38.8%).

Cependant, ces deux valeurs sont toutes deux supérieures aux références que l'on a pu trouver par ailleurs, et l'effort de traction calculé ne semble pas aberrant. Il apparaît donc que les pertes estimées (coefficient de roulement, transferts) ou calculées (glissement, pente) ont été correctement évaluées, le surcroît de puissance nécessaire pour effectuer le labour sur andosol semble avant tout le fait de la résistance de l'outil au travail, plutôt que des pertes entre arbre de roue et barre de traction.

Il convient de rappeler que l'effort de traction est proportionnel à la largeur et à la profondeur de travail, pour un sol donné. Il n'y a, *a priori*, aucune corrélation entre puissance au moteur et effort de traction (BOURNAS, 1973).

Les incertitudes liées à l'enchaînement des calculs à partir de la puissance à la prise de force seraient levées par une mesure directe de l'effort de traction, d'où l'intérêt de dispositifs métrologiques complémentaires concernant l'effort à la barre actuellement mis au point au Laboratoire de Métrologie du CIRAD-SAR à Montpellier.

L'ensemble des données obtenues est original. D'abord parce qu'il améliore la connaissance de l'aptitude culturelle du milieu andique ; ensuite parce qu'il provient d'une démarche qui prend en compte la variabilité spatiale des caractéristiques du milieu et met en jeu des méthodes nouvelles de métrologie du fonctionnement des matériels et de traitement des données.

IV. Conclusion à la troisième partie

Dans la seconde partie de ce travail, l'étude systématique et approfondie de plusieurs types de matériaux à caractères andiques, extraits de leur environnement naturel, a permis de cerner leurs différents fonctionnements élémentaires et évolutions sous contraintes.

Dans cette troisième partie de l'étude, focalisée sur les andosols non perhydratés, les fonctionnements des différents types d'horizons culturaux est abordée, en une approche agronomique et écologique.

Ainsi, après que des paramètres de la fertilité physique aient été décrits et quantifiés, c'est la notion plus globale d'aptitude culturale du milieu qui est envisagée. Dans le contexte climatique et géomorphologique des Hauts de l'ouest de la Réunion, et au sein de systèmes de culture à base de plantes sarclées vivrières, c'est la fonction occupée par le sol dans le processus producteur qui est étudiée sous divers aspects : déterminismes d'évolution des couches superficielles, leurs interactions avec les opérations culturales et les peuplements végétaux.

□ Fonctionnements structuraux et hydrodynamiques superficiels, le problème de l'érosion

Dans les sols sous friche ou forêt, la forte dualité structurale entre horizon superficiel humifère Aa et horizon d'altération Sa résulte principalement des actions bioclimatiques : apports organiques importants, macro et microfaune actives, activité racinaire... Les profils sont stables, l'érosion inexistante.

Les faciès superficiels différenciés des sols cultivés résultent des mêmes facteurs (histoire, "fond" pédogénétique), auxquels s'ajoutent les alternances climatiques exacerbées (cycles dessiccation / humectation), et les effets de la mise en culture (mise à nu cyclique du substrat, remaniement et mélange par les outils, érosion pluviale intense, minéralisation de la matière organique....).

Ce ne sont plus les mêmes structures que sous litière. De structures construites en agrégats grumeleux, issus de l'activité de la faune et microflore du sol, on aboutit à des structures mécaniques (HENIN *et al.*, 1969), issus de contraintes physiques :

- tensions à la dessiccation, qui génère une structure particulière ;
- contraintes mécaniques, qui fractionnent, mélangent, découpent des éléments à partir d'horizons plus profonds.

Les observations faites à l'échelle parcellaire confirment la forte incidence de la nature pédogénétique et du bioclimat. L'anthropisation des substrats agricoles induit cependant des évolutions contrastées :

- la variabilité parcellaire de l'état structural superficiel est importante si l'on considère les différents faciès affleurants (Aa ou Sa dégradé), les opérations de préparation des sols réduisent globalement cette variabilité ;
- la mise en culture, et particulièrement le travail du sol, provoque une réduction significative de la taille des structures construites élémentaires (agrégats), et modifie leur stabilité ;

- la taille des agrégats est la variable la plus sensible à la mise en culture, la stabilité structurale semble dépendre principalement de facteurs édaphiques (type d'horizon).

L'absence ou la très faible cohésion de structures construites de type motte est une constante, dans tous les types d'horizons culturels.

Au plan des fonctionnements hydrodynamiques superficiels, des caractères typiques et essentiels sont mis en évidence :

- malgré des conditions érosives drastiques (pentes, pluviométrie, perméabilité des sols), l'efficacité des pluies reste modérée : les coefficients de ruissellement K_r sont inférieurs à 30% ;

- sous pluies de l'ordre de 50 mm/h, les processus de battance et de réorganisations superficielles sont très discrets lorsque l'horizon Aa agrégé est présent, plus marqués lorsque l'horizon Sa dégradé et particulaire affleure, cela confirme la notion d'autocatalyse des processus érosifs sur andosols ;

- l'initiation du ruissellement est typique au matériau, gouvernée par la profondeur de l'horizon agrégé ou particulaire qui s'engorge progressivement, et sous lequel affleure le matériau Sa continu, de conductivité hydraulique réduite ;

- le ruissellement diffus, pourtant de faible compétence, transporte des éléments structuraux en l'état (agrégats), du fait de leur faible masse volumique et de leur mouillabilité réduite ;

- les quantités de terre exportées par ruissellement diffus (mesurées lors de nos manipulations) sont modérées et sans commune mesure avec les pertes en terre constatées ; cela implique que l'érosion la plus abrasive naît de ruissellement concentré, parcellaire et inter-parcellaire, lié à l'anastomose de rigoles.

Ainsi, le fonctionnement particulier des andosols est mis en évidence, ainsi que leur aptitude intrinsèque modérée au ruissellement. Les conditions de mise en culture et les aménagements parcellaires apparaissent alors déterminants.

☐ Relations milieu - opérations culturales - peuplements végétaux : aspects méthodologiques et résultats

Une étude des relations sol - machine a été mise en oeuvre, ponctuelle et apte à caractériser certains comportements des matériels de préparation des sols, à évaluer leur incidence sur des potentialités agronomiques des substrats.

La recherche puis la mise en oeuvre de méthodes d'étude à l'échelle parcellaire par des traitements de données spatialisées, permettent la mise en relation de données de différentes natures : pédologique, machiniste, agronomique. Cette approche intégrée fournit des résultats intéressants et ouvre un champ nouveau d'investigations dans le domaine, permettant en particulier un suivi parcellaire sur plusieurs cycles culturels.

Concernant les relations substrat - peuplement végétal (limité à deux cas, maïs et haricot), de nombreux points importants sont soulignés par cette méthode :

- concordance des statuts des éléments nutritifs essentiels, selon le type d'horizon superficiel, selon la profondeur de mesure, et concordance avec les rendements observés à l'échelle parcellaire ;

- importance de la fertilité intrinsèque au substrat superficiel pour la culture du maïs, on souligne ainsi l'intérêt agronomique et prédictif de l'analyse de sol, de la connaissance du milieu ;
- sensibilité de la culture du haricot à la part de fertilité anthropique : importance des intrants (engrais, travail du sol) ;
- mise en évidence des facteurs édaphiques limitants les rendements à l'échelle parcellaire, la mise en relation des données permet en outre d'affiner l'interprétation des résultats d'analyses de sol.

Concernant les interactions sol - machine, cette approche permet d'étudier l'effet de caractéristiques physiques du sol sur le fonctionnement des matériels. En ce sens, elle valorise l'évaluation des performances des machines réalisée avec la chaîne de mesure embarquée. Elle permet aussi d'étudier l'impact du travail du sol sur des marqueurs édaphiques de la fertilité en prenant en compte la variabilité spatiale.

On montre ainsi que :

- compte tenu des caractéristiques porales du matériau andique, les outils ont plutôt un effet d'émiettement et d'homogénéisation que d'ameublissement des substrats ; l'effet desséchant du travail du sol est souligné ;
- le glissement des cellules motrices est lié à des caractéristiques du substrat andique : humidité superficielle, masse de terre retournée ; et à des conditions de travail : profondeur ;
- glissement et puissance développée aux roues sont très liés, cette puissance est élevée, et correspond grossièrement à des références obtenues par ailleurs sur matériau argileux lourd ;
- ce surcroît de puissance nécessaire semble être plutôt occasionné par la résistance que le matériau oppose à l'outil (collages, résistance au passage de l'outil ...), les pertes mesurées entre essieux moteurs et barre de traction (pente et glissement) étant très variables mais faibles et compatibles avec des références obtenues par ailleurs.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les deux objectifs de ce travail étaient :

- la description des horizons cultureux de sols andiques de l'île de la Réunion, sous l'angle de leurs caractéristiques physiques, hydriques et mécaniques, originales et sujettes à variations dans le temps et l'espace, à l'échelle régionale et parcellaire, et critères de jugement sur les potentialités de ces milieux vis-à-vis de la mise en culture ;

- la définition de composantes de l'aptitude culturale de ces milieux, par la mise en relation *in situ* de certaines de ces caractéristiques et de fonctionnements macroscopiques (dynamiques de l'eau et des structures) avec les conditions de mise en culture, le comportement des plantes, les opérations culturales.

La forte réactivité de ces matériaux à des variations de contraintes énergétiques, permet d'aborder plus largement le problème de l'anthropisation d'horizons superficiels, en équilibre dans des contextes naturels, et qui évoluent sous culture en des substrats différenciés et souvent instables, dont la variabilité, la réactivité et la vitesse d'évolution ne peuvent être décrites par les seules références pédogénétiques. Les notions d'histoire culturale et énergétique, d'érosion, de système de culture, de système de production, s'imposent alors comme déterminants de l'état d'un substrat à un instant donné.

La démarche méthodologique développée s'est donc attaché à définir les fonctionnements élémentaires des matériaux puis à étudier les comportements agronomiques *lato-sensu* des couches superficielles. Elle détermine évidemment les résultats obtenus, qui apparaissent de trois ordres :

- connaissance des propriétés physiques, hydriques et mécaniques élémentaires de différents matériaux à caractères andiques ;
- connaissance de fonctionnements *in situ* (dynamiques de l'eau et des structures) et déterminismes d'évolution des horizons cultureux d'andosols ;
- mise au point d'une méthodologie d'étude intégrée, mettant en relation à l'échelle parcellaire des données quantitatives de différentes natures, obtention de références.

Ces résultats sont rappelés ici de façon synthétique (leur développement technique figure dans les conclusions de chaque partie), leurs implications et prolongements à venir exposés.

□ Propriétés physiques élémentaires

Le terme générique de "sols à caractères andiques" correspond bien à une réalité fonctionnelle. Le degré d'andicité se rapporte en fait à un degré de réactivité du matériau aux contraintes et à la notion de seuil de réversibilité de l'évolution des caractéristiques physiques au sens large ; il est gouverné à l'échelle régionale par la nature pédogénétique des matériaux : régime hydrique (donc situation altitudinale) et minéralogie (halloysite dominante, puis halloysite et allophanes *I-s*, puis allophanes dominants).

Les sols à caractères andiques s'étagent en séquences depuis des sols bruns à halloysite, des andosols faiblement désaturés puis désaturés, jusqu'aux andosols perhydratés.

Au plan fonctionnel et globalement, ces sols présentent une réactivité croissante vis-à-vis des contraintes hydriques, liées à une porosité croissante. Les seuils de réversibilité d'évolution des propriétés physiques sont définis précisément pour deux types de matériaux typiques (brun à halloysite et andosol désaturé). Une étude fine de l'évolution de l'architecture de la phase solide sous contrainte montre qu'elle gouverne l'ensemble de ces propriétés. Ces contraintes modifient drastiquement les caractéristiques des matériaux.

Sur sols andiques, la notion d'histoire énergétique du matériau est exacerbée, spectaculairement active à pas de temps court et apte à modifier des propriétés classiquement décrites comme figées (granulométrie des particules élémentaires stables, affinité pour l'eau, propriétés mécaniques...).

On note que ces matériaux sont peu réactifs vis-à-vis des contraintes mécaniques, en particulier la sensibilité au compactage est faible, l'évolution de l'espace poral étant gouvernée par l'état hydrique.

Au plan manipulateur, le schéma d'analyse granulométrique proposé est opérationnel pour la gamme de sols étudiée.

□ Fonctionnements et déterminismes d'évolution des andosols *in situ*

La mise en culture des sols correspond à leur exposition à de nouvelles contraintes : défrichement et mise à nu cyclique, remaniement et mélange par les outils ...

Pour les couches superficielles des andosols non perhydratés d'altitude, ces contraintes provoquent des modifications irréversibles de leur architecture et donc de leurs propriétés, modifications conformes aux processus élémentaires décrits plus hauts, ces contraintes constituent les premiers facteurs de différenciation des faciès contrastés observés. Dans un contexte érosif, le décapage localisé des couches superficielles et les opérations de préparation des substrats accélèrent encore le processus.

Une étude de l'état structural des couches superficielles est conduite, ses caractéristiques conditionnent l'environnement racinaire des cultures et les propriétés hydrodynamiques des substrats.

L'origine pédogénétique des horizons affleurants détermine encore nettement ces propriétés (taille et stabilité des agrégats), on montre cependant que le travail du sol réduit significativement la taille des structures construites élémentaires (agrégats).

Les processus d'initiation du ruissellement générateur d'érosion sont abordés, le fonctionnement particulier des andosols est mis en évidence : engorgement progressif des couches superficielles, régime d'infiltration gouverné par l'horizon continu sous jacent, transport direct des agrégats non déstructurés lorsque l'horizon Aa agrégé s'est maintenu, effet de battance et réorganisations superficielles des sols dégradés.

Ces processus soulignent l'importance d'un traitement systémique des phénomènes érosifs, puisque le ruissellement diffus et localisé, objet de l'étude, reste peu abrasif, ce sont :

- l'accumulation intra et inter parcellaire des lames d'eau ruissellantes,

- l'anastomose en rigoles favorisée par des impluviums trop importants,
 - l'entretien involontaire de chemins d'eau (absence de barrières filtrantes efficaces entre parcelles),
- qui sont responsables des pertes en terre agricole les plus importantes.

Les références acquises permettent de préciser certains termes du bilan hydrique (pluies efficaces, ruissellement). De nouvelles manipulations sont en cours pour préciser les fonctionnements hydrodynamiques et structuraux superficiels sous fortes pluies, en prenant en compte des systèmes de culture alternatifs (travail minimum du sol, entretien de couvertures vives pérennes).

Concernant les opérations de préparation des sols, l'analyse du comportement des matériels et de leur impact sur les couches superficielles montre globalement que :

- l'utilisation d'une mécanisation lourde, issue du système cannier, est mal adapté aux zones de production à géranium et cultures associées (comportements difficiles à maîtriser du fait des pentes, travail imparfait),
- le matériau n'est pas réellement ameubli (en terme de gain de porosité), mais émietté et desséché durablement,
- le matériau est homogénéisé.

Dans les zones d'élevage (productions fourragères) et de productions horticoles intensives, des contraintes spécifiques appellent des solutions techniques plus adaptées (gestion de la pierrosité et confection de substrats de qualité sur sols bruns andiques à vocation maraîchère du sud, préparation de substrats et de lits de semence moins sensibles à l'érosion sur andosols perhydratés à vocation fourragère en altitude ...).

Dans la zone à géranium et cultures associées, les motivations et les conséquences agronomiques du recours au labour militent pour l'exclusion de cette opération et une refonte des systèmes de culture. De nouveaux systèmes sont d'ores et déjà expérimentés (maîtrise chimique de l'enherbement, préparation minimale des substrats, entretien de couvertures vives pérennes) et leurs impacts sur le milieu sont caractérisés (hydrodynamique, système poral).

□ Méthodologie d'étude des relations milieu - système de culture - plante

Une méthodologie d'étude intégrée des relations milieu - système de culture - plante, à l'échelle de la parcelle agronomique, a été mise au point puis expérimentée. Cette méthode permet *in fine* de mettre en relation des données de différentes natures : milieu physique (physique et chimie des substrats) ; machine (performances des cellules motrices, fonctionnement des outils) ; plante (comportements des peuplements végétaux).

Si l'intérêt des résultats formels obtenus est diminué du fait de la mise au point nécessaire et progressive, concomitante à l'expérimentation, l'ensemble de la méthode proposée doit permettre à court terme et moyennant quelques calages (outils mathématiques, dispositifs d'essais adaptés ...) d'obtenir des références intéressantes.

Au plan des relations milieu - plante, on peut identifier et hiérarchiser les principaux facteurs édaphiques intervenant dans l'établissement des rendements de cultures-type. L'optimisation technique et économique des systèmes de culture peut être entreprise à partir des références obtenues.

Au plan des interactions milieu - opérations mécanisées, l'approche proposée ouvre de nouveaux champs d'investigation : il s'agit non seulement de connaître les performances des matériels de travail du sol en conditions réelles (chaîne de mesure embarquée), mais également de définir l'incidence de paramètres édaphiques sur ces performances, et d'évaluer leur évolution dans l'espace parcellaire et dans le temps, au fil des cycles cultureux.

Des recherches méthodologiques concernant cette approche globale, intégrée, se poursuivent. D'autres milieux et cultures constituent de nouveaux objets de recherche (systèmes de culture canniers, maraichers).

L'échelle d'étude des relations plantes - milieu - technique est le plus souvent pluri-stationnelle ou pluri-parcellaire (GRAS, 1981 ; DELVAUX *et al.*, 1986 ; BRUCE *et al.*, 1990), elle dépend principalement des objectifs définis (taille de la gamme de variations...) et des facteurs pressentis comme déterminants (édaphiques, climatiques...).

Le développement récent d'études sur la variabilité spatiale de propriétés du sol à l'échelle parcellaire, puis de leurs inter-relations avec le rendement des cultures mettant en jeu des outils mathématiques nouveaux (MUNOZ-PARDO *et al.*, 1990), permet aujourd'hui d'étudier les composantes intervenant sur l'élaboration du rendement, sur la réalisation des opérations culturales. Ces méthodes nouvelles doivent permettre d'atteindre l'objectif finalisé de la recherche en agronomie des régions inter-tropicales : pouvoir identifier, étudier en milieu réel et hiérarchiser les composantes des systèmes de culture, puis d'agir sur elles pour améliorer la production.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

ADAM de VILLIERS C., 1990. Contribution à l'étude du splash et du ruissellement sous pluies simulées intenses sur andosols des Hauts de l'ouest de La Réunion.

Université de Nice / Université de La Réunion, DEA Structures et dynamiques spatiales, 75p et annexes.

ADJIRI F., 1991. Modélisation du comportement au transport de cellules motrices adaptées aux pentes
ESAT-CNEARC, CIRAD Réunion,

A.I.S.S., 1976. Soil physics terminology

Bulletin de l'Association Internationale de Science du Sol, (48) : 16-22.

A.F.N.O.R., 1987. Analyse granulométrique par sédimentation. Méthode de la pipette. Norme expérimentale X 31-107.

In : Association Française de Normalisation. Qualité des sols. Méthodes d'analyse. 1ère édition, 1987, 15p.

ALWIS P.L.A.G., 1990. Recherches préliminaires à la modélisation du système tracteur-outil-sol. Cas de la houe rotative.

Thèse de Docteur-Ingénieur, ENSA Montpellier-LAGEPHY, 132p.

Anonyme, 1970. Limites d'Atterberg : limite de liquidité - limite de plasticité. Mode opératoire G.4.

In : Modes Opératoires du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Dunod édit., Paris, 1970, 27p.

Anonyme, 1970. Essai de retrait des sols. Norme ASTM D 427-39.

In : Modes Opératoires du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Dunod édit., Paris, 1970, 4p.

Anonyme, 1991. Machinisme : IV. Les tracteurs.

In : Mémento de l'agronome, 4ème édition, Ministère de la Coopération et du Développement, collection "Techniques Rurales en Afrique, p415-445.

ASSELINE J., 1981. Construction d'un infiltromètre à aspersion. Note technique.

Document ORSTOM, 22p.

ASSELINE J., M'TIMET A., PONTANIER J., CLERY J., 1987. Une méthode de caractérisation en zone aride et semi-aride, des états de surfaces élémentaires (1m²) soumises à des averses contrôlées.

Gouttes et Splash vol.4 (1) : 13-17

BACHELERY P., 1981. Le Piton de La Fournaise (Ile de La Réunion). Etude volcanologique, structurale et pétrologique.

Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Clermont-Ferrand, 215p et annexes.

BAIZE D., 1988. Guide des analyses courantes en pédologie.

I.N.R.A., Paris, 1988, 172p.

BARTHELEMY P., BOISGONTIER D., LAJOUX P., 1987. Choisir les outils de travail du sol.

Institut Technique des Céréales et des Fourrages, 1987, Paris, 198p.

BEAUMONT A., LAPEYRONNIE J., TESSIER D., 1989. Techniques d'étude de la porosité et du contenu en eau de mottes préparées à différents pF.

Station de Science du Sol, I.N.R.A. Versailles, 14p.

BECLIN C., MICHELLON R., PIROT R., PERRET S., 1987. Travail du sol dans les Hauts de l'ouest.

In: Rapport Annuel CEEMAT Réunion 1986, p 47-53.

BERTRAND R., 1972. Environnement et morphologie d'un andosol à horizon d'accumulation induré.

Compte rendu de l'Académie des Sciences, Paris, 275 (D):1343-1346.

- BIELDERS C.L., De BAKER L.W., DELVAUX B., 1990. Particle density of volcanic soils as measured with a gas pycnometer. Soil Science Society of America Journal, 54 : 822-826.
- BIRRELL K. S., 1952. Some physical properties of New Zealand volcanic ash soils. 1st Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Melbourne, pp30-34.
- BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., 1976. Climat, stabilité structurale de la terre. Annales Agronomiques, 27 (4) : 447-463.
- BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., 1982. Fertilité, potentialité, aptitudes culturales. Signification actuelle pour l'agronome. Bulletin Technique d'Information, n° 370/372, 1982 : 345-353.
- BOIFFIN J., MONNIER G., 1982. Etats, propriétés et comportements des sols : recherche et utilisation de critères de fertilité physique. Bulletin Technique d'Information, n° 370/372, 1982 : 401-407.
- BOIFFIN J., GUERIF J., STENGEL P., 1990. Les processus d'évolution de l'état structural du sol : quelques exemples d'études expérimentales récentes
In : Les colloques de l'INRA, n°53 : La structure du sol et son évolution, Laon, 09/01/1990, pp 37-70.
- BOIVIN P., 1988. Programmes conversationnels de calcul géostatistique pour micro ordinateur, GEOSTAT-PC. Bulletin du Groupe Français d'Humidimétrie Neutronique et de techniques associées, n°23, p77-92.
- BONFILS P., DUPUIS M., 1969. Etude de la dispersion des colloïdes du sol à l'aide de vibrations ultra-sonores. Science du Sol, n°1, 1969 : 13-22.
- BONFILS P., MOINEREAU J., 1971. Propriétés physiques des andosols et des sols bruns andiques au sud du Massif Central. Cahiers ORSTOM, Série Pédologie. IX (3) : 345-363.
- BONNEAU M., LEVY G., 1979. Assemblage et organisation physique des particules.
In : Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol. Masson éditeur, p 234-250.
- BOUDOT J.P., 1990. Classification des constituants alumineux non cristallins des sols andiques en fonction de leur aptitude à freiner la minéralisation de la matière organique.
In : Journées Nationales de l'Etude du Sol, Orléans, 19-21/11/1990, INRA-SESCPF, AFES.
- BOUGERE J., GOPAL A., 1986. Erosion et bilan hydrique de surface. Programme quadriennal 1985-1988 : Eaux superficielles et souterraines à La Réunion, Rapport scientifique 1985, Université / Conseil Régional / Conseil Général, 131p.
- BOUGERE J., GOPAL A., 1988. Erosion et bilan hydrique de surface. Programme quadriennal 1985-1988 : Eaux superficielles et souterraines à La Réunion, Rapport scientifique 1986-1987, Université / Conseil Régional / Conseil Général, 64p.
- BOUGERE J., 1988. Aperçu sur l'érodibilité des andosols cultivés à La Réunion.
In : Les andosols de l'île de La Réunion, préparation d'un programme de recherches pluridisciplinaires, CIRAD-CNRS-INRA-ORSTOM-Université, Séminaire de Saint Denis, 24/05-01/06/1988, p 155-162.
- BOUGERE J., HEBERT A., MICHELLON R., 1990. Protection contre l'érosion.
In : Manuel des Techniciens du Géranium, édition APR 1990, 15p.
- BOURNAS L., 1973. L'adhérence du tracteur agricole. Etudes du CNEEMA, nov. 1973, n°385, 79p, p47-51.

BOURSIN J.-L., 1981. Méthodes statistiques de la gestion.

Vuibert éditeur, Paris, 120p.

BOWERS W., 1977. To get a perfect match.

Farm and Power Equipment, vol 64, n°1, p25-26.

BRIDIER B., 1985. Quel avenir pour le géranium et le développement agricole dans les Hauts de l'ouest de La Réunion ?.

L'Agronomie Tropicale. 40 (4) : 342-356.

BROUWERS M., RAUNET M., 1981. Inventaire morphopédologique dans les Hauts de La Réunion. Aptitudes agricoles des terres.

Etablissement Public Régional, DDA, IRAT, 89p, annexes et cartes morphopédologiques au 25000^{ème}.

BROUWERS M., 1982. Le milieu physique et les sols de la zone de moyenne altitude de S^t Paul. Aptitude à la canne à sucre.

Document DDA-IRAT, 49p, annexes et carte morphopédologique au 25000^{ème}.

BROUWERS M., 1984. Reconnaissance pédologique de la zone de moyenne altitude de La Saline à S^t Leu. Aptitude des sols à la culture sous irrigation.

Document DDA-IRAT, 27p et carte morphopédologique au 25000^{ème}.

BROUWERS M., FORTIER M., 1989. Recherche d'un test pour le suivi de l'agrégation des sols andiques réunionnais.

LAGEPHY Montpellier, mars 1989, note technique n°1, 17p.

BRUAND A., 1986. Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau.

Science du Sol, 24 (4) : 351-362.

BRUCE R.R., SNYDER W.N., WHITE A.W., THOMAS A.W., LANGDALE G.W., 1990. Soil variables and interactions affecting prediction of crop yield pattern.

Soil Science Society of America Journal, vol. 54, n°2, mars-avril 1990 : 494-501.

BURGESS T.M., WEBSTER R., 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging.

Journal of Soil Science, n°31, p315-331.

CADET T., 1980. La végétation de l'île de La Réunion. Etude phytoécologique et phytosociologique.

Thèse de docteur ès science, Université de La Réunion, 312p.

CASENAVE A., 1982. Le mini-simulateur de pluie : conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures.

Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol. XIX (4) : 207-227.

CASENAVE A., 1986. Programme d'analyse du ruissellement, de l'infiltration et de l'érosion à l'aide des techniques de simulation de pluies.

Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 17-18/09/1985, ORSTOM, p10-17.

CHAMAYOU H., LEGROS J.P., 1989. Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la Science du Sol.

ACCT-CILF, P.U.F. éditeur, 593p.

CHARVE H., 1972. Etude de la stabilité structurale de quelques sols sur basalte (Plateau du Coiron).

USTL / ENSA Montpellier, 33p.

CHASTEL J-M., 1990. La filière géranium.

In: Manuel des techniciens du géranium. Edition 1990. Géranium Conseil (APR-CIRAD-SAFER-SPV-SUAD), 11p.

CHAUVEL A., MONNIER G., 1967. Sur la signification générale de l'analyse granulométrique en pédologie; examen des problèmes posés par la caractérisation de la texture de certains sols tropicaux.

C.R. Académie des Sciences, Paris, t. 264, avril 1967, série D : 1969-1972.

CHEVALIER L., 1979. Structure et évolution du volcan du Piton des Neiges, Ile de La Réunion. Leurs relations avec les structures du bassin des Mascareignes.

Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Grenoble, 187p.

CHEVIGNARD T., 1985. Etude de la formation actuelle d'horizons humifères en milieu tropical. Cas des sols de culture "remodelés" de la Martinique.

Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Nancy I, 83p et annexes.

CLARIOND A., PERRET S., 1990. Impact du feu sur les caractéristiques physico-chimiques d'un andosol.

Note technique 02/90, CEEMAT-CIRAD Réunion, 7p.

CLEMENT B., 1970. Etude des propriétés physiques des andosols et sols andiques. Recherche de corrélations entre les propriétés mécaniques et la rétention de l'eau.

USTL Montpellier, ENSA / INRA Montpellier, 31p et annexes.

CLOTHIER B. E., WHITE I., 1981. Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field.

Soil Science Society of America Journal, vol 45 : 241-245.

COLLINET J., VALENTIN C., 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle.

Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. 17 (4) : 283-328.

COLMET-DAAGE F., LAGACHE P., 1965. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises.

Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. III (2) : 91-121.

COLMET-DAAGE F., CUCALON F., DELAUNE M., GAUTHEYROU J. et M., MOREAU B., 1967. Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. 1^{ère} partie : Essai de caractérisation des sols des régions tropicales humides.

Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. V (1) : 3-38.

COLMET-DAAGE F., De KIMPE C., DELAUNE M., GAUTHEYROU J. et M., SIEFFERMANN G., FUSIL G., 1970. Caractéristiques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques de la côte Pacifique du Nicaragua.

Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. VIII (2) : 113-172.

COLMET-DAAGE F., GAUTHEYROU J. et M., DE KIMPE C., FUSIL G., 1972. Dispersion et étude des fractions fines de sols à allophanes des Antilles et d'Amérique Latine. 1^{ère} partie : La dispersion.

Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. X (2) : 169-191.

COSTET J., SANGLERAT G., 1981. Cours pratique de mécanique des sols. Tome 1 : Plasticité et calcul des tassements.

Dunod édit., 3^{ème} édition, Bordas, Paris, 1981, 283p.

COULOMB I., 1991. Analyse quantitative du comportement du sol au labour. Rôle de l'état structural initial.

Thèse de doctorat de l'INA-PG, 230p et annexes.

COUTERON P., 1987. Lutter contre l'érosion à La Réunion : première approche du problème

Commissariat à l'Aménagement des Hauts, Direction de l'Agriculture et de la Forêt, Conseil Général, 40p.

COX W.J., ZOBEL R.W., VAN ES H.M., OTIS D.J., 1990. Tillage effects on some soil physical properties and corn physiological characteristics.

Agronomy Journal, vol. 82 (4) : 806-812.

C.P.C.S., 1967. Classification des sols.

Commission de Pédologie et de Cartographie des sols, édition 1967, 96p.

CRADWICK P.D.G., FARMER V.C., RUSSEL J.D., 1972. Imogolite: a hydrated aluminium silicate of tubular structure.

Nature Phys. Sci., 240, p187-189.

DAGNELIE P., 1975. Théorie et méthodes statistiques. II. Les méthodes de l'inférence statistique.

Presses Agronomiques de Gembloux, 1975, 463p.

DAGNELIE P., 1975. Analyse statistique à plusieurs variables.

Presses Agronomiques de Gembloux, 1975, 362p.

DALLEINNE E., 1979. Les façons en travail du sol. Tome 4. Choix des outils pour corriger au mieux le profil cultural.

Etudes du CNEEMA n°455, sept. 1979, 75p.

DANFLOUS J.P., 1991. Essais de travail du sol.

In: Rapport Annuel CEEMAT Réunion 1990, p 63-64.

DENAIX L., 1989. Etude des constituants et de la micro-organisation d'andosols de La Réunion.

D.E.A. de pédologie, Université Paris VI, INRA Versailles, 48p et annexes.

DELHOMME J.P., 1976. Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau.

Thèse de Docteur-Ingénieur, Paris VI, 130p.

DELVAUX B., LASSOUDIERE A., PERRIER X., MARCHAL J., 1986. Une méthodologie d'étude des relations sol-plante-techniques

culturelles par enquête diagnostic. Application à la culture bananière au Cameroun. Synthèse des résultats.

Fruits - vol. 41, n°6, 1986 : 359-370.

DELVAUX B., 1988. Constituants et propriétés de surface des sols dérivés de pyroclastes basaltiques du Cameroun occidental. Approche génétique de leur fertilité.

Thèse de doctorat de spécialité, Université Catholique de Louvain, 335p.

DIRECTION DE L'AGRICULTURE ET DE LA FORET, 1990. Annuaire de statistique agricole. Données de l'année 1989.

Ministère de l'Agriculture et de la Forêt. D.A.F. Service de Statistique Agricole. St Denis. 60p.

DUCREUX A., 1984 Caractérisation mécanique des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche de l'Afrique de l'ouest. Etude d'un prototype d'outils permettant de les travailler en période sèche.

Thèse de docteur-Ingénieur, USTL Montpellier, 134p et annexes.

DUCREUX A., PERRET S., SIEGMUND B., VAKSMANN M., 1989. Utilisation d'une sonde gamma-neutronique à l'île de La Réunion.

Machinisme Agricole Tropical, (106) : 36-45.

DURET M., 1982. Pluies génératrices de crues à La Réunion.

Direction Départementale de l'Équipement, 95p.

EGAWA T., 1977. Properties of soils derived from volcanic ash.

In : Soils derived from volcanic ash in Japan, Ishizuka Y et Black C.A. éditeurs, CIMMYT, Mexico, 1977, p 10-63.

EGGLETON R.A., 1987. Non-cristalline Fe-Si-Al Oxyhydroxydes.

Clays and clay minerals, 35 (1) : 29-37.

EMERSON W.W., 1991. Structural decline of soils, assessment and prevention.

Australian Journal of Soil Research, 1991, 29 : 905-921.

- FAURE A., FIES J. C., 1972. Etude expérimentale de la sensibilité au compactage de matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique.
Annales Agronomiques, 23 (3) : 317-323.
- FAURE A., 1978. Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains.
Thèse de doctorat ès Sciences, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 179p.
- FIES J. C., 1971. Recherches d'une interprétation texturale de la porosité des sols.
Annales Agronomiques, 22 (6) : 655-685.
- FORTIER M., BROUWERS M., 1987. Caractéristiques physiques de quatre sols réunionnais. Résultats et synthèse des mesures exécutées au laboratoire.
Note IRAT/DRN, Laboratoire de Physique et Mécanique des Sols, 31p.
- FOURNIER P., 1985. Expérimentation sur tracteur à alcool.
Mémoire CEEMAT-ESEM.
- GARIN P., 1987. Système de culture et itinéraires techniques dans les exploitations à base de géranium dans les Hauts de l'ouest de La Réunion.
L'Agronomie Tropicale. 42 (4) : 289-356.
- GARON J., 1990. Etude d'une chaîne de mesures de terrain pour matériels agricoles.
Mémoire CEEMAT-ENITRTS, 125p et annexes.
- GASCUEL-ODOUX C., 1984 Applications de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol.
Thèse de Docteur-Ingénieur en géologie appliquée, ENSA Rennes, Université Paris VI, ENSM Paris, 235p.
- GAUDY F., 1990. Comportement hydrodynamique et évolution de l'état structural des horizons de surface sous pluie simulée. Cas d'un andosol cultivé de l'île de La Réunion.
CNEARC-CIRAD Réunion, 63p et annexes.
- GEE G.W., BAUDER J.W., 1986. Particle-size analysis.
In : Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd Edition, A. Klute editor, A.S.A.-S.S.S.A. publisher, Madison WI. : 383-411.
- GENERE B., 1985. Elaboration d'un programme multilocal de recherches agroclimatiques sur la canne à sucre à La Réunion.
Thèse de docteur-ingénieur, ENSA Montpellier, 115p.
- GENSE C., 1976. L'altération des roches volcaniques basiques sur la côte orientale de Madagascar et à La Réunion.
Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Institut de Géologie, Strasbourg, 176p.
- GEPPA, 1981. Synthèse des travaux de la Commission de Cartographie 1970-1981. Définition des caractéristiques essentielles des sols.
Groupement d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée, 1981, 18p.
- Golden Software Inc., 1990. Surfer Version 4, Reference Manual.
Copyright Golden Software, Inc. 1989, 1990; Golden, Colorado, USA. 371p et annexes.
- GRANJEAN E., 1983. Relation entre la minéralogie des fractions fines et le comportement hydrique des sols. Toposéquence développée sur des cendres andésitiques. Basse Terre, Guadeloupe.
D.E.A. Pédologie et Aménagement des sols, Paris VII-VI, INAPG, 72p.
- GRAS R., 1981. Aperçu méthodologique sur l'étude in situ des relations plantes - milieu - techniques : l'enquête.
INRA, 1981, Groupe de recherches non-sectorielles, R. GRAS rapporteur, 83p.

GUENNELON R., 1955. Conservation des sols et lutte contre l'érosion à l'île de La Réunion.

Annales Agronomiques, n°3, mai-juin 1955 : 423-497.

GUIMONT J., 1980. Le choix d'un matériel agricole.

Etude du CNEEMA n°470.

HENENSAL P., 1987. Le risque d'érosion hydrique des sols.

Bulletin du Laboratoire des Ponts et Chaussées, n°150-151, 1987 : 117-129.

HENIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques.

Masson et cie, éditeurs, Paris, 332p.

HENIN S., 1976. Cours de Physique du Sol. I : Texture - structure - aération.

ORSTOM et EDITEST éditeurs, Bruxelles, 159p.

HENIN S., 1977. Cours de Physique du Sol. II : L'eau et le sol - les propriétés mécaniques - la chaleur et le sol.

ORSTOM et EDITEST éditeurs, Bruxelles, 222p.

HERBILLON A.J., 1983. Apports des approches expérimentales à la connaissance des constituants minéraux du sol à organisation cristalline à courte distance.

Science du Sol, n°3-4, 1983, p153-162.

HETIER J.M., 1975. Formation et évolution des andosols en climat tempéré.

Thèse de doctorat ès sciences, Université de Nancy I, 194p.

HILL R.L., 1990. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties.

Soil Science Society of America Journal, vol. 54 (1) : 161-166.

HILLEL D., 1975. Soil and water, physical principles and processes.

Academic Press pub. 288p.

HONG T., 1990. Contribution à la modélisation des performances de traction d'un tracteur agricole au labour

Thèse de Docteur-Ingénieur, ENSA Montpellier, CEMAGREF, 210p.

JACQUIN E., 1990. Etude d'une méthode de mesure des efforts dans l'attelage du couple tracteur-outil porté.

CNEARC, Ministère de l'Agriculture, CEEMAT-CIRAD Montpellier, 70 p. et annexes.

JOURNEL A.G., HUIJBREGTS Ch.J., 1978. Mining Geostatistics.

Academic Press Ltd, Londres, ré-édition 1989, 600p.

JOUE S., 1984. Caractéristiques hydriques et hydrodynamiques de deux types de sol : andosol - sol brun à caractère andique.

Mémoire Université d'Avignon, CIRAD IRAT Réunion, 112p.

KANWAR R.S., 1989. Effects of tillage systems on the variability of soil-water tensions and soil-water content.

Transactions of the ASAE, vol. 32 (2) : 605-610.

KUBOTA T., 1972. Aggregate-formation of allophanic soils : effect of drying on the dispersion of the soils.

Soil Science and Plant Nutrition, 18 (2) : 79-87.

LAFFORGUE A., NAAH E., 1976. Exemple d'analyse expérimentales des facteurs de ruissellement sous pluies simulées.

Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol. 13 (3) : 195-236.

LAFFORGUE A., 1977. Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelle. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées.

Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol. 14 (4) : 229-344.

LAUGROST Y., 1987. Mise au point et étude d'une chaîne de mesures automatisée pour tracteurs.

Mémoire CEEMAT-ENSA Montpellier.

LE BISSONNAIS Y., 1988. Analyse des mécanismes de désagrégation et de mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies.

Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 225p.

LEGROS J.P., 1982. L'évolution granulométrique au cours de la pédogénèse. Approche par simulation sur ordinateur. Application aux sols acides sur matériaux cristallins en zone tempérée.

Thèse de Doctorat d'Etat, USTL Montpellier - INRA, 436p.

LEPETIT J., 1989. Mécanisation de montagne.

Document CEEMAT.

LOYNET G., 1975. Relations entre les propriétés hydriques, la matière organique et les substances amorphes dans des sols sur matériaux basaltiques en climat tropical humide.

ENSA Montpellier / IRAT, 32p.

LOZET J., MATHIEU C., 1986. Dictionnaire de science du sol.

Lavoisier éditeur, coll. Tec & Doc, Paris, 269p.

LUC J. P., 1978. Caractérisation hydrique des sols. Utilisation des mesures d'humidité et de charge *in situ*. Comparaison avec les mesures de laboratoire.

Thèse de doctorat de spécialité, USTL, Montpellier, 169p.

MAEDA T., WARKENTIN B.P., 1975. Void changes in allophane soils determining water retention and transmission.

Soil Science Society of Am. Proceedings, 39 : 398-403.

MAEDA T., TAKENAKA H., WARKENTIN B.P., 1977. Physical properties of allophane soils.

Advances in agronomy, 29 : 229-264.

MAEDA T., SOMA K., WARKENTIN B.P., 1983. Physical and engineering characteristics of volcanic ash soils in Japan compared with those in other countries.

Irrigation Engineering and Rural Planning, (3), 1983 : 16-31.

MANICHON H., 1973. Exigences des plantes et travail du sol.

Etudes du CNEEMA, n°385, nov. 1973, p 1-6.

MANICHON H., 1982. L'action des outils sur le sol: appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural.

Science du Sol, n°3, 1982, p203-219.

MANICHON H., 1988. Le travail du sol : position du problème.

In : Fertilité physique et travail du sol. Chambre Régionale d'Agriculture Rhone-Alpes, coordonateur : F. Michaux, juin 1988, p 7-8.

MANIERE G., 1973. Contribution à l'étude des zones compactées des horizons superficiels d'un sol complanté de vignes et désherbé chimiquement; utilisation de la méthode Proctor.

Thèse de doctorat de spécialité, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 116p.

MICHELLON R., GARIN P., 1985. Recherche-Système dans les Hauts de l'ouest ; Synthèse des résultats obtenus : le géranium, le haricot, la pomme de terre, le tabac, le maïs, les fruitiers tempérés.

In : Bilan de la Recherche-Système dans les Hauts de l'ouest. Journées du 25-27/11/1985, CIRAD Réunion, p 129-201.

MICHELLON R., 1986. Stabilisation et maîtrise de systèmes de production à base de géranium.

In : Rapport Annuel IRAT-CIRAD, Réunion, 1986, p 155-161.

- MICHELLON R., CHASTEL J.-M., 1988. Recherches sur les systèmes de production agricole dans les Hauts de l'Ouest.
In: Cinq années de recherches agronomiques 1984-1988, IRAT Réunion, CIRAD, p 97-111.
- MONNIER G., STENGEL P., FIES J.C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol.
Annales Agronomiques, 24 (5) : 533-545.
- NEBOIT R., 1983. L'homme et l'érosion.
Université de Clermont-Ferrand, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Fascicule 17, 1983, 183p.
- OGAWA K., TAKEUCHI Y., KATAYAMA M., 1988. Influence of minimum tillage on soil properties and crop yields in gleyic andosol.
Research Bulletin of the Hokkaido National Agricultural Experiment Station, 150, 1988 : 57-90.
- PAILLAT J.-M., 1986. Implantation des prairies.
In : Rapport Annuel CEEMAT CIRAD Réunion, 1986, p 108-123.
- PAILLAT J.-M., 1988. Travail du sol : préparation du lit de semence.
Document de formation CIRAD-CEEMAT, 1988, 141p.
- PAILLAT J.-M., PERRET S., 1988. Travail du sol pour l'implantation des prairies.
In : Rapport Annuel CEEMAT CIRAD Réunion, 1988, p 111-124.
- PAPY F., 1987. Comportement d'une couche labourée sous des actions de compactage en fonction de son état hydrique et structural.
Agronomie, 7 (2), p111-121.
- PARFITT R.L., CLAYDEN B., 1991. Andisols - The development of a new order in Soil Taxonomy.
Geoderma, 49 (1991) : 181-198.
- PATERSON E., 1976. Specific surface area and pore structure of allophanic soil clays.
Clay Minerals, 12 (1) : 1-9.
- PENSEC A., 1987. Influence du séchage sur les caractéristiques physico-chimiques des sols à caractère andique.
Université de Bordeaux I / IRAT CIRAD Réunion, 125p.
- PERROUX K.M., WHITE I., 1988. Designs for disc permeameters.
Soil Science Society of America Journal, 52 (5) : 1205-1215.
- PERRET S., 1988. Travail du sol sous cultures vivrières : effets du labour sur l'état du profil cultural.
Séminaire CIRAD, Contrat de Plan Etat-Région Réunion, avril 1988, 15p.
- PERRET S., DANFLOUS J.-P., CLARIONDA A., 1991. Expérimentation d'outils de préparation de sol en maraîchage sur andosol. 1. Impacts sur les propriétés physiques et le fonctionnement hydrodynamique de l'horizon cultural.
Note technique 01/91, CIRAD-CEEMAT Réunion, 14p.
- PIKUL J.L., ZUZEL J.F., RAMIG R.E., 1990. Effects of tillage-induced soil macroporosity on water infiltration.
Soil and Tillage Research, 17 (1990) : 153-165.
- PIROT R., MICHELLON R., 1986. Travail du sol dans les Hauts de l'ouest.
In : CEEMAT Antenne de La Réunion. Rapport Annuel 1986. CEEMAT-CIRAD, p65-68.
- PIROT R., MICHELLON R., 1987. Hauts de l'ouest : cultures vivrières.
In : CEEMAT Antenne de La Réunion. Rapport Annuel 1987. CEEMAT-CIRAD, p137-142.
- PIROT R., OUF H., 1987. Recherches de voies de mécanisation pour les Hauts de l'Ouest.
In : CEEMAT Antenne de La Réunion. Rapport Annuel 1987. CEEMAT-CIRAD, p103-127.

PIROT R., 1988. Mise au point d'un système de mesure de terrain.

In: Rapport Annuel 1988 CEEMAT Réunion, p135-146.

PY F., CLARIONDA A., 1989. Influence de l'érosion et des techniques culturales sur les caractéristiques des andosols de La Réunion.

Etude des relations entre stock organique, stabilité structurale et activité microbienne.

ENSAT / IRAT-CIRAD, 103p et annexes.

QUANTIN P., 1972. Les Andosols. Revue bibliographique des connaissances actuelles.

Cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie, X (3): 273-301.

QUANTIN P., 1987. Les Andosols.

In : Les sols tropicaux, module D1, cours de D.E.A. de Pédologie, Paris, Département Enseignement de l'ORSTOM, Bondy, 55p.

QUANTIN P., 1990. Les Andisols (Sols Andiques).

In: Répertoire Pédologique Français, 3^{ème} proposition, avril 1990, AFES-INRA, Plaisir, France, p71-78.

RAATS P.A.C., 1971. Steady infiltration from point sources, cavities and basins.

Soil Science Society of America Journal, vol. 35, 1971 : 328-335.

RAUNET M., 1988. Carte morphopédologique au 50000^{ème}. Département de La Réunion.

CIRAD-IRAT, Conseil Régional de La Réunion, 4 feuilles.

RAUNET M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole.

CIRAD-IRAT / Région Réunion, 438p.

RICHARDS L.A., 1941. A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution.

Soil Science, (51) : 377-386.

RIQUIER J., 1960. Notices sur les cartes pédologiques de reconnaissance, Ile de La Réunion.

ORSTOM-IRMS Madagascar, Tananarive, 72p.

RIQUIER J., ZEBROWSKI C., 1975. Pédologie de La Réunion.

In: L'Atlas des D.O.M. La Réunion, planche 10, CNRS-IGN. 4p et carte.

ROOSE E., 1981. Dynamique actuelle des sols ferralitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées.

Travaux et Documents de l'ORSTOM, n°130, 569p.

ROOSE E., 1984. Causes et facteurs de l'érosion hydrique sous climat tropical. Conséquences sur les méthodes anti-érosives.

Machinisme Agricole Tropical, (87) : 4-17.

ROSELLO V., 1982. Compte rendu de recherches bibliographiques concernant l'altération de matériaux volcaniques, ainsi que la formation et les propriétés des sols qui en dérivent.

Document DDE - Centre Universitaire de La Réunion, Laboratoire de Géologie - Université Paris VII, Laboratoire de Pédologie, 87p.

ROSELLO V., 1984. Les sols bruns des Hauts (Ile de La Réunion). Caractérisation minéralogique et microstructurale de matériaux andosoliques. Reconnaissance expérimentale de leur comportement.

Thèse de doctorat de spécialité, Université Paris VII, 200p.

ROUSSEAU J.M., WARKENTIN B.P., 1976. Surface properties and forces holding water in allophane soils.

Soil Science Society of America Journal, 40, 1976 : 446-451.

SAUER T.J., CLOTHIER B.E., DANIEL T.C., 1990. Surface measurements of the hydraulic properties of a tilled and untilled soil.

Soil & Tillage Research, 15 (1990) : 359-369.

SCOTTER D.R., CLOTHIER B.E., HARPER E.R., 1982. Measuring saturated hydraulic conductivity and sorptivity using twin rings. Australian Journal of Soil Research, vol.20 : 295-304.

SEBILLOTTE M., 1990. Améliorer la gestion de la fertilité physique par l'agriculteur : réflexions pour une politique régionale.

In : Les colloques de l'INRA, n°53 : La structure du sol et son évolution, Laon, 09/01/1990, pp 187-216.

SIEFFERMANN G., 1969. Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun.

Thèse de doctorat ès Sciences Nat., Université de Strasbourg, 285p.

SIEGMUND B., DUCREUX A., 1982. Utilisation du test Proctor pour l'étude des phénomènes de compactage apparaissant en culture de canne à sucre sur parcelles récoltées mécaniquement.

In : Rapport Annuel CEEMAT Réunion 1982, pp177-191.

SIEGMUND B., 1984. Lutte contre le ver blanc.

In : Rapport Annuel CEEMAT-CIRAD Réunion, 1984, p 11-17.

SIEGMUND B., 1988. Travail du sol : préparation profonde.

Document de formation CIRAD-CEEMAT, 1988, 117p.

SIEGMUND B., 1990. Mécanisation de la canne à sucre. Les différents matériels expérimentés à l'île de La Réunion. Synthèse des travaux 1979-1989.

Document CEEMAT-CIRAD, 66p.

STENGEL P., 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique *in situ*.

Annales Agronomiques, 30 (1) : 27-51.

STENGEL P., 1990. Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes.

In : Les colloques de l'INRA, n°53 : La structure du sol et son évolution, Laon, 09/01/1990, pp 15-36.

TESSIER D., 1980. Sur la signification de la limite de retrait dans les argiles.

C.R. Académie des Sciences, Paris, t. 291, septembre 1980, série D : 377-380.

TESSIER D., 1984. Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation.

Thèse de doctorat ès Sciences, Paris VII, INRA édit, 361p.

THONY J.L., VACHAUD G., VAUCLIN M., 1988. Analyse critique de mesures tensiométriques par capteur de pression portatif.

Bulletin du G.F.H.N. Milieux poreux et transferts hydriques, nov. 88, (24) : 37-60.

THONY J.L., 1990. Infiltromètre à succion contrôlée (sorptivimètres). Notice d'utilisation provisoire.

Institut de Mécanique de Grenoble, groupe Hydrologie, mai 1990, 9p.

TREVISAN D., 1986. Comportement hydrique et susceptibilité à l'érosion des sols limoneux cultivés. Etude expérimentale au champ sous pluies simulées.

Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 244p.

TUNCER E. R., LOHNES R. A., DEMIREL T., 1977. Desiccation of soils derived from volcanic ash.

Transportation Research Record, 1977, vol. 642 : 44-49.

U.S.D.A., 1975. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey.

U.S.D.A., Handbook n°436, Washington, USA, 754p.

YAKSMANN M., 1987. Etude du fonctionnement hydrique des andosols et des sols andiques de l'île de La Réunion.

Thèse de doctorat de spécialité, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 170p.

- Van OORT F., 1984. Géométrie de l'espace poral, comportement hydrique et espace poral. Application à des sols sous prairie et alpage, issus de l'altération des calcschistes sédimentaires en moyenne et haute montagne, Alpes du Nord (Beaufortain).
Thèse de docteur-ingénieur, INAPG, 281p.
- Van OORT F., DOREL M., 1988. Physico-chemical and physical properties of halloysite rich soil in Guadeloupe.
24^{ème} Congrès Société Caraïbe des Plantes Alimentaires, INRA-CIRAD, 7p et annexes.
- VAUCLIN M., 1982. Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol.
In: Les Colloques de l'INRA, Colloque S.H.F.-I.N.R.A., Avignon, 24-25 juin 1982, p9-43.
- VOLTZ M., 1986. Variabilité spatiale des propriétés physiques du sol en milieu alluvial. Essai de cartographie quantitative des paramètres hydrodynamiques.
Thèse de docteur-ingénieur, ENSA Montpellier, 198p.
- WADA S.I., WADA K., 1977. Density and structure of allophane.
Clay minerals, 12:289-298.
- WARRICK A.W., MYERS D.E., NIELSEN D.R., 1986. Geostatistical methods applied to soil science.
In: Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods. Second edition. A. Klute editor, p53-82.
- WESLEY L. D., 1973. Some basic engineering properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia.
Géotechnique, 23, n°4 : 471-494.
- WEYLAND M., 1990. Etude expérimentale de l'espace poral et des comportements hydriques et hydrodynamiques d'andosols cultivés de l'île de La Réunion.
ENSA Toulouse - CEEMAT-CIRAD Réunion, 83p et annexes.
- WOODING R.A., 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond.
Water Resource Research, Vol 4, 1968 : 1259-1273.
- ZEBROWSKI C., 1975. Etude d'une climatoséquence dans l'île de La Réunion.
Cahiers ORSTOM, série Pédologie, XIII (3-4): 255-278.
- ZHAI R., KACHANOSKI R.G., VORONEY R.P., 1990. Tillage effects on the spatial and temporal variations of soil water.
Soil Science Society of America Journal, Vol. 54 (1) : 189-192.

Annexes

- Lexique et liste des sigles et abréviations
- Profils de la séquence ouest, description et analyses
- Profils de la séquence sud, description et analyses
- Noms abrégés et unités des variables attribuées aux placettes et segments
- Analyse multivariable Maïs
- Analyse multivariable Haricot
- Analyse multivariable Labour
- Carte des $\Delta\theta$ entre mars 90 et août 89, dispositif Fond Jardin
- Principaux modèles de variogrammes
- Développement des équations du krigeage

Lexique et liste des sigles et symboles employés

Grandeurs relatives à la description du sol, à son fonctionnement

γ_d : masse volumique apparente sèche, densité apparente sèche

γ_s : masse volumique du solide, masse volumique des grains, poids spécifique, densité réelle

e : indice de vide

θ : indice d'eau

n : porosité

W : teneur en eau massique

θ : teneur en eau volumique

pF : potentiel énergétique de l'eau, logarithme décimal de la hauteur d'eau équivalente ou succion ou potentiel matriciel

MWD_{lav} ou MWD : taille moyenne pondérale des agrégats lavés sur tamis

MWD_{us} : taille moyenne pondérale des agrégats lavés sur tamis et soumis à sonification

S : indice de stabilité des agrégats

WL : limite de liquidité, teneur en eau massique à la limite de liquidité

WP : limite de plasticité, teneur en eau massique à la limite de plasticité

WR : limite de retrait, teneur en eau massique à la limite de retrait

IP : indice de plasticité

K_s ou K_{sat} : conductivité hydraulique à saturation

$K(h)$: conductivité hydraulique exprimée en fonction de la succion ou potentiel matriciel

A : teneur massique en argile

LF : teneur massique en limons fins

LG : teneur massique en limons grossiers

SF : teneur massique en sables fins

SG : teneur massique en sables grossiers

Grandeurs relatives aux hydrogrammes sous pluie simulée

T_0 : début de la pluie simulée (temps)

I : intensité de la pluie simulée

R : intensité de ruissellement

R_x : intensité de ruissellement maximum, au palier

F : intensité d'infiltration

F_n : intensité d'infiltration au palier de ruissellement maximum

T_i : début de ruissellement (temps)

T_m : début du palier de ruissellement (temps)

Tu : arrêt de la pluie simulée (temps)

Te : durée de la pluie occasionnant un ruissellement

Ds : quantité de ruissellement récupéré après arrêt de la pluie, détention superficielle récupérable

Lr : quantité totale d'eau ruissellée

Tf : fin du ruissellement (temps)

Pu : précipitation totale de durée Tu

Pi : précipitation limite de ruissellement, pluie d'imbibition, de durée Ti

Pe : pluie efficace, accompagnant le ruissellement, de durée Te

Kr : coefficient de ruissellement global, $Kr = (Lr / Pu) \cdot 100$

Sigles d'organismes cités dans le texte

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CEEMAT : Centre d'Etude et d'Expérimentation en Machinisme Agricole Tropical, Département du CIRAD intégré en 1992 au sein du CIRAD-SAR : Systèmes Agro-alimentaires et Ruraux

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

ORSTOM : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération

IMG : Institut de Mécanique de Grenoble

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

ENSAM : Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier

CEMAGREF : Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

CPCS : Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols

GEPPA : Groupement d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée

USDA : United States Department of Agriculture

AISS : Association Internationale de Science du Sol

APR : Association pour la Promotion en milieu Rural (Réunion)

SAFER : Société d'Aménagement Foncier et d'Etablissement Rural

PAH : Plan d'Aménagement des Hauts (Réunion)

PCES : Plan de Consolidation de l'Economie Sucrière (Réunion)

Abréviations diverses

M.A. : million d'années

M.O. : matière organique

CEC : Capacité d'Echange Cationique

CV : coefficient de variation

MS : matière sèche

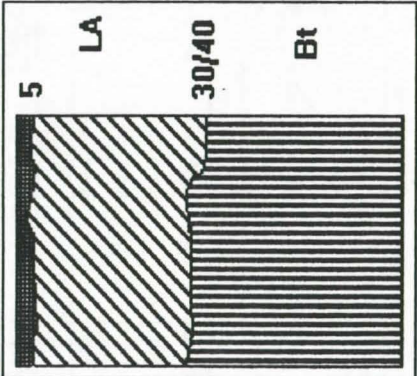
Profils de la séquence ouest

VILLELE 380m. Profil O1. Brunisol (Tropept)

Profondeur	Horizon	pH eau	N /mille	C %	P. ass. ppm
10 - 20	A	4.9	1.98	2.01	122
30 - 40	B	5.9	1.42	1.14	16

Profondeur	Ca meq/100g	Mg meq/100g	CEC meq/100g	Sat. %CEC
10 - 20	6.28	2.77	13.7	74
30 - 40	10.2	4.17	17	86

Profondeur	Densité app.	Humidité pond.
10 - 20	1.31	25.05
30 - 40	1.24	26.85



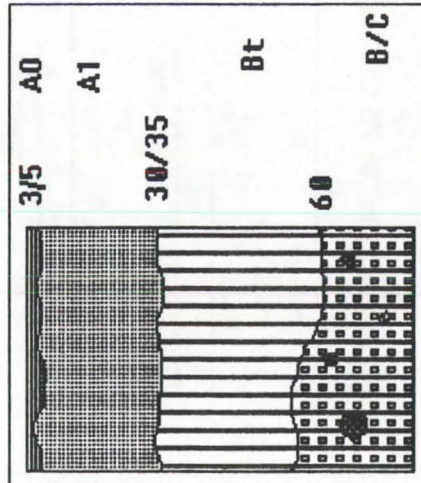
Profil sous canne à sucre
Sol brun développé sur des coulées de la phase IV (mugéarites en gratons, Piton des Neiges)
0-3cm : Litière de feuilles de canne en décomposition
3-30cm : en mélange avec des agrégats grumeleux, mésofaune abondante
LA, horizon brun foncé (7.5YR2-3), argileux, structure polyédrique grossière à mottes décimétriques compactes, cohérentes, d'aspect sec
porosité fissurale importante entre mottes, pores biologiques (vers)
pierrosité nulle, nombreuses racines de canne
30-70cm Bt, horizon brun (7.5YR3-4), argileux et frais, structure fondue, porosité fine, quelques racines, pas de mésofaune

LA SALINE 620m. Profil O2. Brunisol andique (Andic tropept)

Profondeur	Horizon	pH eau	N /mille	C %	P. ass. ppm
10 - 30	A	5.9	2.7	2.5	106
40 - 60	B	6.1	1.5	1.3	61
60 - 80	B / C	6.6	0.5	0.4	21

Profondeur	Ca meq/100g	Mg meq/100g	CEC meq/100g	Sat. %CEC
10 - 30	8.9	3.2	14.6	84
40 - 60	6.2	2.4	11.1	81
60 - 80	5.6	3.3	11.3	83

Profondeur	Densité app.	Humidité pond.
10 - 30	0.87	42.84
40 - 60	1.04	47.08



Profil sous canne à sucre

Sol brun andique développé sur cendres trachytiques

(épandage sur coulées de la phase IV)

0-5cm : Litière organique, résidus de canne en décomposition, mésofaune abondante

5-30cm : A, horizon brun foncé (7.5YR2-3), humifère

structure polyédrique grossière, sous-structure finement grumeleuse

forte macroporosité, texture argileuse, sèche au toucher

pierrosité nulle, très nombreuses racines de canne

Bt, horizon brun-jaune (5YR3-6), structure grossière polyédrique, peu de racines

fraîs, argileux et plastique au toucher, pierrosité nulle

B/C, horizon semblable mais à structure fondue,

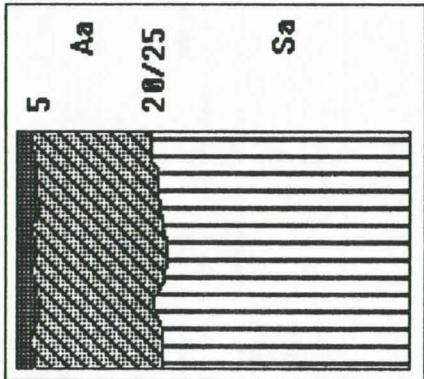
blocs de tuf jaune par place

COLIMACONS 780m. Profil O3. Andosol saturé (Eutrandept)

Profondeur	Horizon	pH eau	N /mlle	C %	P.ass. ppm
10 - 20	A	5.5	3.8	4.2	287
30 - 40	B	6.3	1.3	1.3	51

Profondeur	Ca meq/100g	Mg meq/100g	CEC meq/100g	Sat. %CEC
10 - 20	8.7	1.2	12.1	90
30 - 40	6.3	1.3	10.1	79

Profondeur	Densité app.	Humidité pond.
10 - 20	0.88	46.16
30 - 40	0.76	66.43



Profil sous friche herbacée (après géranium)
 Sol développé sur cendres trachytiques

0-5cm : Litière organique, talles de graminées
 toucher sableux et sec, structure finement particulaire

5-25cm : Aa, horizon brun (7.5YR3.4) de toucher limono-sableux, frais
 nombreuses racines et vers de terre
 structure finement grumeleuse à polyédrique, forte porosité
 pierrosité nulle

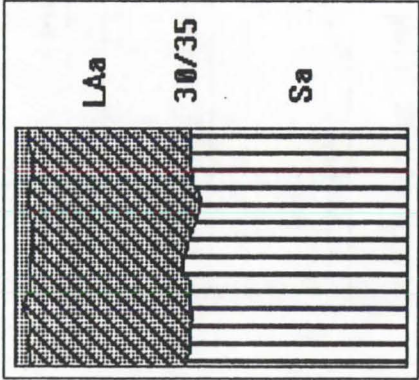
25-70cm : Sa, horizon brun-jaune (10YR4-6) à structure continue
 finement poreuse, peu de racines, pierrosité nulle
 frais et limoneux au toucher

TROIS BASSINS COCATRE 1000m. Profil O4. Andosol désaturé (Dystrandept)

Profondeur	Horizon	pH eau	N /mille	C %	P.ass. ppm
10 - 30	A	5.8	7.5	8.3	596
40 - 60	B	5.7	5.3	7.2	246

Profondeur	Ca meq/100g	Mg meq/100g	CEC meq/100g	Sat. %CEC
10 - 30	12.5	1.4	16.3	90
40 - 60	5.4	0.8	10.4	63

Profondeur	Densité app.	Humidité pond.
10 - 30	0.75	65.85
40 - 60	0.53	119.87



Profil sous rotation vivrière maïs/haricot
Sol développé sur cendres trachytiques

0-35cm : LAa, horizon brun foncé (7.5YR3-4) très meuble
très poreux, sablo-limoneux et sec au toucher
structure finement grumeleuse à particulaire
couche pulvérulente en surface

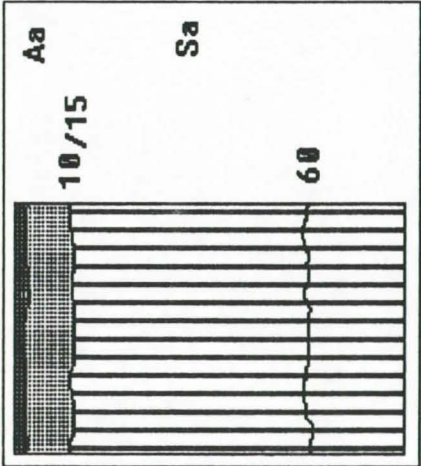
35-70cm : Sa, horizon brun-jaune (10YR4-6) à structure fondue, peu de macropores
peu de racines, toucher très frais à gras, limono-argileux
pierrosité nulle

BRAS CALEBASSE 1230m. Profil O5. Andosol perhydraté (Hydrandept)

Profondeur	Horizon	pH eau	N /mille	C %	P.ass. ppm
5 - 15	A	4.7	8.4	15	153
40 - 60	B	5	5	8.7	220

Profondeur	Ca meq/100g	Mg meq/100g	CEC meq/100g	Sat. %CEC
5 - 15	1.1	0.5	6.3	27
40 - 60	0.2	0.01	7.8	2

Profondeur	Densité app.	Humidité pond.
5 - 15	0.55	81.42
40 - 60	0.38	101.39



Profil sous prairie

Sol développé sur cendres trachytiques

0-15cm : Aa, horizon brun-noir (7.5YR2-2), humifère, très meuble
chevelu racinaire très dense, structure particulaire fine
toucher sablo-limoneux, sec, mésofaune active, pierrosité nulle

15-60cm : Sa, horizon brun-jaune rougeâtre (5YR3-6), structure fondue
quelques racines, faible macroporosité, toucher gras, limoneux
pierrosité nulle

60-80cm : horizon semblable, brun jaune foncé (7.5YR3-4), plus compact

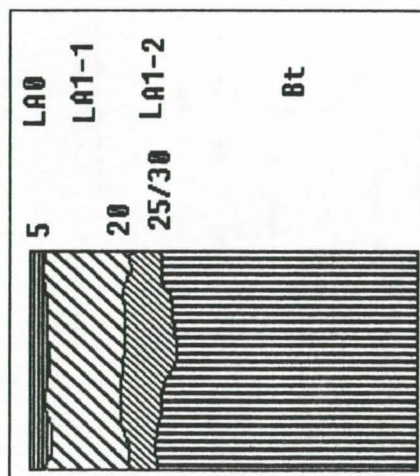
Profils de la séquence sud

BERIVE 500m. Profil S1. Brunisol andique (Andic Tropept)

Profondeur	Horizon	pHeau	N/mille	C %	P.ass. ppm
10 - 20	A	5.2	3.1	3.6	54
40 - 60	B	5.4	1	0.9	1

Profondeur	Ca meq/100g	Mg meq/100g	CEC meq/100g	Sat. %CEC
10 - 20	3	1.4	6.1	83
40 - 60	0.6	0.3	1.9	53

Profondeur	Densité app.	Humidité pond.
10 - 20	0.95	36.84
40 - 60	0.97	41.24



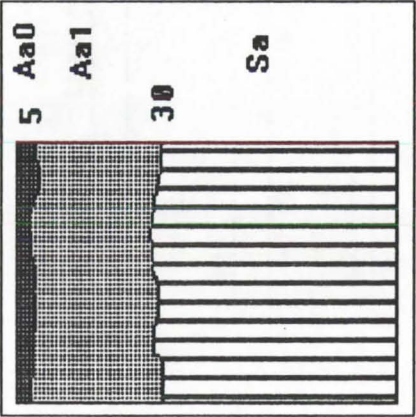
Profil sous canne à sucre
 Sol développé sur cendres trachytiques
 0-5cm : Litière de canne en décomposition, structure fine grumeleuse
 mésofaune importante
 5-20cm : LA, horizon brun-rouge (2.5YR3-3), structure grumeleuse
 toucher frais, limono-sableux, pierrosité nulle
 20-30cm : horizon brun-rouge foncé (2.5YR2-4), structure grumeleuse à polyédrique
 toucher frais et limono-argileux, pierrosité nulle
 30-70cm : Bt, horizon brun-rouge (2.5YR3-3), structure grossière polyédrique
 toucher frais à humide, argilo-limoneux, pas de racines, pierrosité nulle

LE TAMPON 700m. Profil S2. Andosol saturé (Eutrandept)

Profondeur	Horizon	pH eau	N /mille	C %	P.ass. ppm
10 - 20	A	5.1	2.8	3.5	207
40 - 60	B	5.5	1.2	1.2	28

Profondeur	Ca meq/100g	Mg meq/100g	CEC meq/100g	Sat. %CEC
10 - 20	6	1.5	9.6	87
40 - 60	3.2	1.1	6.9	64

Profondeur	Densité app.	Humidité pond.
10 - 20	0.87	68.97
40 - 60	0.73	75.34



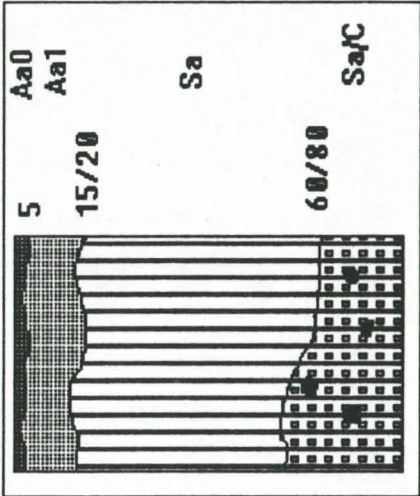
Profil sous canne à sucre
Sol développé sur cendres trachytiques
0-5cm : Litière organique, agrégats humifères grumeleux
5-30cm : Aa, horizon brun-jaune (7.5YR3-4), grossièrement grumeleux, mésofaune (vers) toucher gras, limono-argileux, pierrosité nulle
30-80cm : Sa, horizon Brun-jaune clair (7.5YR4-6), structure fondue, ni racines, ni vers, toucher gras, limoneux, pierrosité nulle

BRAS CREUX 900m. Profil S3. Andosol perhydraté (Hydrandept)

Profondeur	Horizon	pH eau	N /mille	C %	P.ass. ppm
10 - 20	A	5.5	6.3	8.6	427
30 - 40	B	5.3	2.5	3.3	174

Profondeur	Ca meq/100g	Mg meq/100g	CEC meq/100g	Sat. %CEC
10 - 20	4.7	1.1	7.5	81
30 - 40	1.5	0.5	6.3	35

Profondeur	Densité app.	Humidité pond.
10 - 20	0.68	55.88
30 - 40	0.47	121.28



Profil sous canne à sucre
 Sol développé sur cendres trachytiques
 0-5cm : Litière organique, structure grumeleuse, mésofaune
 5-20cm : Aa, horizon brun clair (10YR4-4), nombreuses racines et vers
 toucher gras et limoneux, structure grossière, grumeleuse à polyédrique
 pierrosité nulle
 20-60cm : Sa, horizon brun (10YR3-4), pas de mésofaune, peu de racines,
 toucher gras, savonneux, limoneux, structure fondue, macroporosité nulle
 pierrosité nulle
 60-80cm : Sa/C, horizon brun-jaune foncé (10YR2-3), toucher plus friable, limono-sableux
 niveaux de cendres moins altérées, blocs centimétriques de tuf
 pas de racines

Noms abrégés et unités utilisés pour les variables attribuées aux placettes agronomiques et aux segments labourés

Placettes maïs / haricot :

azote : azote total pondéral pour mille

carbo : carbone total pondéral % Anne

calci : calcium échangeable méq/100g (Hexamine Cobalt)

CEC : capacité d'échange cationique méq/100g (Hexamine Cobalt)

densi ou ds : masse volumique apparente sèche g/cm³

hump ou hv : teneur en eau volumique g/cm³

potas : potassium échangeable méq/100g (Hexamine Cobalt)

phosp : phosphore assimilable ppm Olsen-Dabin

pheau : pH eau

rdt : rendement en g de grains sains à 85% de MS (maïs), à 83% de MS (haricot)

labou ou itin : itinéraire technique, labour ou sillonage direct, sur horizon Aa ou Sa affleurant

MWD : diamètre moyenne pondéral des agrégats inférieurs à 5 mm, en mm.

Les indicateurs A ou 1 marquent une mesure à 10-15 cm de profondeur

Les indicateurs B ou 2 marquent une mesure à 30-35 cm de profondeur

Segments labourés

Eau : teneur en eau volumique g/cm³

MVA ou MVAS : masse volumique apparente humide g/cm³

Prof ou pro : profondeur de travail en m

Volum ou vol : volume de terre travaillé en m³

Masse ou Mas : masse de terre travaillée en kg

Dist ou Dis : longueur du segment, distance parcourue en 6s, en m

Reg ou Regim : régime moteur en t/min

Gliss ou gli : glissement en %

Pente ou Pen : pente en %

Conso ou Con : consommation horaire de carburant en l/h

Pui.r : puissance développée aux roues du tracteur en kW

Pui.b : puissance développée à la barre de traction en kW

Eff.b : effort de traction développé à la barre en kN

Analyse multivariable Maïs

Définitions et libellés des classes

Mesures à 10-15 cm

VARIABLE	Nb de CLASSES CREEES	CLASSES				Nb.individus
		No	Definition		Libelle	
azote	3	1	azote	de 4.22 à 6.78	N1A	7
		2	azote	> 6.78 à 7.51	N2A	7
		3	azote	> 7.51 à 8.49	N3A	6
carbo	3	1	carbo	de 6.27 à 8.32	C1A	7
		2	carbo	> 8.32 à 9.36	C2A	7
		3	carbo	> 9.36 à 10.47	C3A	6
calci	3	1	calci	de 1.05 à 2.43	L1A	7
		2	calci	> 2.43 à 3.7	L2A	7
		3	calci	> 3.7 à 6.26	L3A	6
cec	3	1	cec	de 2.39 à 4.03	E1A	7
		2	cec	> 4.03 à 5.37	E2A	7
		3	cec	> 5.37 à 8.14	E3A	6
densi	3	1	densi	de .42 à .55	M1A	7
		2	densi	> .55 à .62	M2A	7
		3	densi	> .62 à .78	M3A	6
hump	3	1	hump	de .29 à .36	T1A	7
		2	hump	> .36 à .41	T2A	8
		3	hump	> .41 à .59	T3A	5
potas	3	1	potas	de .043 à .087	K1A	7
		2	potas	> .087 à .133	K2A	7
		3	potas	> .133 à .358	K3A	6
phosp	3	1	phosp	de 197.73 à 334.44	P1A	7
		2	phosp	> 334.44 à 459.05	P2A	7
		3	phosp	> 459.05 à 578.03	P3A	6
pheau	3	1	pheau	de 5.18 à 5.27	H1A	6
		2	pheau	> 5.27 à 5.41	H2A	6
		3	pheau	> 5.41 à 5.78	H3A	8
labou	3	1	LABOUR		LAB	10
		2	no lab Aa		Aa	7
		3	no lab Sa		Sa	3
rendt	3	1	rendt	de 91 à 204	RD1	7
		2	rendt	> 204 à 255	RD2	7
		3	rendt	> 255 à 344	RD3	6

Mesures à 30-35 cm

azot2	3	1	azot2	de	2.22 à 3.79	N1B	7
		2	azot2	>	3.79 à 6.69	N2B	7
		3	azot2	>	6.69 à 7.66	N3B	6
carb2	3	1	carb2	de	3.75 à 6.2	C1B	7
		2	carb2	>	6.2 à 8.91	C2B	7
		3	carb2	>	8.91 à 9.98	C3B	6
calc2	3	1	calc2	de	.14 à .95	L1B	7
		2	calc2	>	.95 à 1.53	L2B	7
		3	calc2	>	1.53 à 2.36	L3B	6
cec2	3	1	cec2	de	1.2 à 3.15	E1B	7
		2	cec2	>	3.15 à 4.08	E2B	7
		3	cec2	>	4.08 à 5.14	E3B	6
dens2	3	1	dens2	de	.4 à .43	M1B	7
		2	dens2	>	.43 à .51	M2B	6
		3	dens2	>	.51 à .67	M3B	7
hump2	3	1	hump2	de	.37 à .46	T1B	8
		2	hump2	>	.46 à .5	T2B	6
		3	hump2	>	.5 à .65	T3B	6
pota2	3	1	pota2	de	.01 à .032	K1B	7
		2	pota2	>	.032 à .046	K2B	7
		3	pota2	>	.046 à .094	K3B	6
phos2	3	1	phos2	de	159.96 à 272.5	P1B	7
		2	phos2	>	272.5 à 351.22	P2B	7
		3	phos2	>	351.22 à 467.49	P3B	6
phea2	3	1	phea2	de	4.83 à 5.15	H1B	7
		2	phea2	>	5.15 à 5.2	H2B	7
		3	phea2	>	5.2 à 5.38	H3B	6

NOMBRE TOTAL DE CLASSES = 60

Tableau de Burt

TABLEAU DES EFFECTIFS

		azote			carbo			calci			cec			densi			hump			potas			phosp		
		M1A	N2A	N3A	C1A	C2A	C3A	L1A	L2A	L3A	E1A	E2A	E3A	M1A	M2A	M3A	T1A	T2A	T3A	K1A	K2A	K3A	P1A	P2A	P3A
azote	N1A	7																							
	N2A	0	7																						
	N3A	0	0	6																					
carbo	C1A	5	2	0	7																				
	C2A	2	3	2	0	7																			
	C3A	0	2	4	0	0	6																		
calci	L1A	4	2	1	4	3	0	7																	
	L2A	3	3	1	3	3	1	0	7																
	L3A	0	2	4	0	1	5	0	0	6															
cec	E1A	5	1	1	4	3	0	6	1	0	7														
	E2A	1	4	2	3	2	2	1	5	1	0	7													
	E3A	1	2	3	0	2	4	0	1	5	0	0	6												
densi	M1A	4	3	0	4	2	1	3	3	1	4	1	2	7											
	M2A	1	3	3	2	2	3	3	1	3	2	3	2	0	7										
	M3A	2	1	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	0	0	6									
hump	T1A	2	3	2	1	4	2	2	3	2	2	4	1	1	3	3	7								
	T2A	2	2	4	3	3	2	3	3	2	2	3	3	3	2	3	0	8							
	T3A	3	2	0	3	0	2	2	1	2	3	0	2	3	2	0	0	0	5						
potas	K1A	4	1	2	3	3	1	3	3	1	4	2	1	2	1	4	2	2	3	7					
	K2A	2	4	1	3	2	2	3	2	2	2	2	3	4	2	1	1	5	1	0	7				
	K3A	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	3	2	1	4	1	4	1	1	0	0	6			
phosp	P1A	5	2	0	6	1	0	5	2	0	5	2	0	4	2	1	1	3	3	4	3	0	7		
	P2A	1	3	3	1	2	4	1	3	3	1	3	3	1	3	3	2	3	2	1	2	4	0	7	
	P3A	1	2	3	0	4	2	1	2	3	1	2	3	2	2	2	4	2	0	2	2	2	0	0	6
pheau	H1A	1	4	1	3	3	0	4	2	0	3	3	0	3	3	0	2	4	0	0	4	2	3	2	1
	H2A	3	1	2	3	1	2	2	3	1	2	4	0	1	2	3	3	1	2	4	0	2	2	2	2
	H3A	3	2	3	1	3	4	1	2	5	2	0	6	3	2	3	2	3	3	3	3	2	2	3	3
labou	LAB	2	5	3	4	4	2	4	4	2	3	6	1	3	5	2	6	4	0	1	4	5	3	3	4
	Aa	2	2	3	0	3	4	1	2	4	1	1	5	2	1	4	1	4	2	3	3	1	1	4	2
	Sa	3	0	0	3	0	0	2	1	0	3	0	0	2	1	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0
rendt	RD1	5	1	1	4	1	2	4	1	2	5	0	2	3	2	2	1	2	4	4	3	0	5	2	0
	RD2	2	3	2	2	3	2	1	4	2	0	4	3	2	2	3	2	4	1	2	2	3	1	4	2
	RD3	0	3	3	1	3	2	2	2	2	2	3	1	2	3	1	4	2	0	1	2	3	1	1	4
azot2	M1B	4	1	2	4	1	2	3	2	2	4	2	1	2	4	1	2	1	4	3	1	3	3	3	1
	M2B	1	5	1	2	4	1	1	4	2	0	4	3	3	2	2	2	4	1	2	3	2	2	2	3
	M3B	2	1	3	1	2	3	3	1	2	3	1	2	2	1	3	3	3	0	2	3	1	2	2	2
carb2	C1B	4	1	2	4	1	2	3	2	2	4	2	1	2	4	1	2	1	4	3	1	3	3	3	1
	C2B	1	3	3	2	2	3	1	2	4	0	2	5	3	2	2	1	5	1	1	4	2	2	2	3
	C3B	2	3	1	1	4	1	3	3	0	3	3	0	2	1	3	4	2	0	3	2	1	2	2	2

calc2	L1B	4	1	2	3	3	1	3	2	2	4	0	3	3	3	1	0	3	4	4	2	1	3	2	2
	L2B	0	4	3	1	2	4	2	2	3	1	4	2	2	3	2	3	3	1	1	3	3	1	4	2
	L3B	3	2	1	3	2	1	2	3	1	2	3	1	2	1	3	4	2	0	2	2	2	3	1	2
cec2	E1B	4	1	2	3	3	1	3	2	2	4	0	3	4	2	1	0	3	4	4	1	2	3	2	2
	E2B	0	5	2	1	3	3	2	3	2	1	5	1	1	4	2	4	2	1	2	3	2	1	3	3
	E3B	3	1	2	3	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	3	3	0	1	3	2	3	2	1
dens2	M1B	3	2	2	2	2	3	1	3	3	2	1	4	3	2	2	0	3	4	4	2	1	2	3	2
	M2B	2	2	2	3	2	1	5	0	1	4	1	1	3	3	0	2	3	1	1	3	2	3	1	2
	M3B	2	3	2	2	3	2	1	4	2	1	5	1	1	2	4	5	2	0	2	2	3	2	3	2
huap2	T1B	3	4	1	3	4	1	4	3	1	3	4	1	2	2	4	5	3	0	2	4	2	3	3	2
	T2B	1	1	4	1	2	3	1	3	2	1	3	2	2	3	1	2	4	0	1	2	3	1	2	3
	T3B	3	2	1	3	1	2	2	1	3	3	0	3	3	2	1	0	1	5	4	1	1	3	2	1
pota2	K1B	3	1	3	2	2	3	2	1	4	3	1	3	2	2	3	2	2	3	4	2	1	3	2	2
	K2B	2	3	2	2	3	2	2	4	1	1	4	2	1	4	2	3	3	1	3	2	2	2	2	3
	K3B	2	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	4	1	1	2	3	1	0	3	3	2	3	1
phos2	P1B	3	3	1	4	1	2	2	2	3	3	1	3	4	2	1	0	2	5	4	2	1	4	2	1
	P2B	3	1	3	2	2	3	2	3	2	1	4	2	1	3	3	4	3	0	2	2	3	2	2	3
	P3B	1	3	2	1	4	1	3	2	1	3	2	1	2	2	2	3	3	0	1	3	2	1	3	2
phea2	H1B	2	2	3	4	1	2	2	3	2	2	3	2	3	1	3	0	5	2	4	3	0	4	2	1
	H2B	1	4	2	1	3	3	1	3	3	1	4	2	2	3	2	6	0	1	1	1	5	0	3	4
	H3B	4	1	1	2	3	1	4	1	1	4	0	2	2	3	1	1	3	2	2	3	1	3	2	1
M1A M2A M3A		C1A C2A C3A			L1A L2A L3A			E1A E2A E3A			M1A M2A M3A			T1A T2A T3A			K1A K2A K3A			P1A P2A P3A					
azote		carbo			calci			cec			densi			huap			potas			phosp					

***** TABLEAU DE BURT *****

=====

TABLEAU DES EFFECTIFS (suite)

	pheau			labou			rendt			azot2			carb2			calc2			cec2			dens2			
	H1A	H2A	H3A	LAB	Aa	Sa	RD1	RD2	RD3	M1B	M2B	M3B	C1B	C2B	C3B	L1B	L2B	L3B	E1B	E2B	E3B	M1B	M2B	M3B	
pheau	H1A	6																							
	H2A	0	6																						
	H3A	0	0	8																					
labou	LAB	6	3	1	10																				
	Aa	0	1	6	0	7																			
	Sa	0	2	1	0	0	3																		
rendt	RD1	1	2	4	1	3	3	7																	
	RD2	2	2	3	3	4	0	0	7																
	RD3	3	2	1	6	0	0	0	0	6															
azot2	M1B	1	4	2	3	1	3	4	1	2	7														
	M2B	3	1	3	4	3	0	0	5	2	0	7													
	M3B	2	1	3	3	3	0	3	1	2	0	0	6												
carb2	C1B	1	4	2	3	1	3	4	1	2	7	0	0	7											
	C2B	2	0	5	3	4	0	1	4	2	0	5	2	0	7										
	C3B	3	2	1	4	2	0	2	2	2	0	2	4	0	0	6									
calc2	L1B	1	2	4	1	3	3	4	2	1	5	2	0	5	2	0	7								
	L2B	3	2	2	4	3	0	1	4	2	1	3	3	1	3	3	0	7							
	L3B	2	2	2	5	1	0	2	1	3	1	2	3	1	2	3	0	0	6						
cec2	E1B	1	2	4	1	3	3	3	3	1	4	3	0	4	3	0	6	1	0	7					
	E2B	3	3	1	5	2	0	1	3	3	2	3	2	2	1	4	1	5	1	0	7				
	E3B	2	1	3	4	2	0	3	1	2	1	1	4	1	3	2	0	1	5	0	0	6			
dens2	M1B	0	2	5	0	5	2	3	4	0	3	3	1	3	3	1	5	2	0	5	2	0	7		
	M2B	4	1	1	5	0	1	2	1	3	2	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	6	
	M3B	2	3	2	5	2	0	2	2	3	2	3	2	2	2	3	0	3	4	0	3	4	0	0	7
huap2	T1B	4	2	2	6	2	0	3	3	2	1	3	4	1	2	5	0	4	4	0	4	4	0	3	5
	T2B	2	2	2	4	2	0	0	2	4	2	2	2	2	3	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	T3B	0	2	4	0	3	3	4	2	0	4	2	0	4	2	0	5	1	0	5	1	0	5	1	0
pota2	K1B	0	2	5	1	4	2	5	1	1	4	1	2	4	2	1	4	2	1	3	2	2	3	1	3
	K2B	2	3	2	4	2	1	1	4	2	1	4	2	1	3	3	2	3	2	2	4	1	3	2	2
	K3B	4	1	1	5	1	0	1	2	3	2	2	2	2	2	2	1	2	3	2	1	3	1	3	2
phos2	P1B	1	2	4	1	3	3	4	2	1	4	3	0	4	3	0	5	1	1	5	1	1	5	1	1
	P2B	1	3	3	4	3	0	1	4	2	2	2	3	2	3	2	1	3	3	1	3	3	2	2	3
	P3B	4	1	1	5	1	0	2	1	3	1	2	3	1	1	4	1	3	2	1	3	2	0	3	3
phea2	H1B	2	2	3	2	3	2	3	3	1	2	3	2	2	4	1	3	3	1	3	2	2	3	2	2
	H2B	2	3	2	6	1	0	0	3	4	2	3	2	2	2	3	0	4	3	1	4	2	1	2	4
	H3B	2	1	3	2	3	1	4	1	1	3	1	2	3	1	2	4	0	2	3	1	2	3	2	1
	H1A	H2A	H3A	LAB	Aa	Sa	RD1	RD2	RD3	M1B	M2B	M3B	C1B	C2B	C3B	L1B	L2B	L3B	E1B	E2B	E3B	M1B	M2B	M3B	
	pheau			labou			rendt			azot2			carb2			calc2			cec2			dens2			

***** TABLEAU DE BURT *****

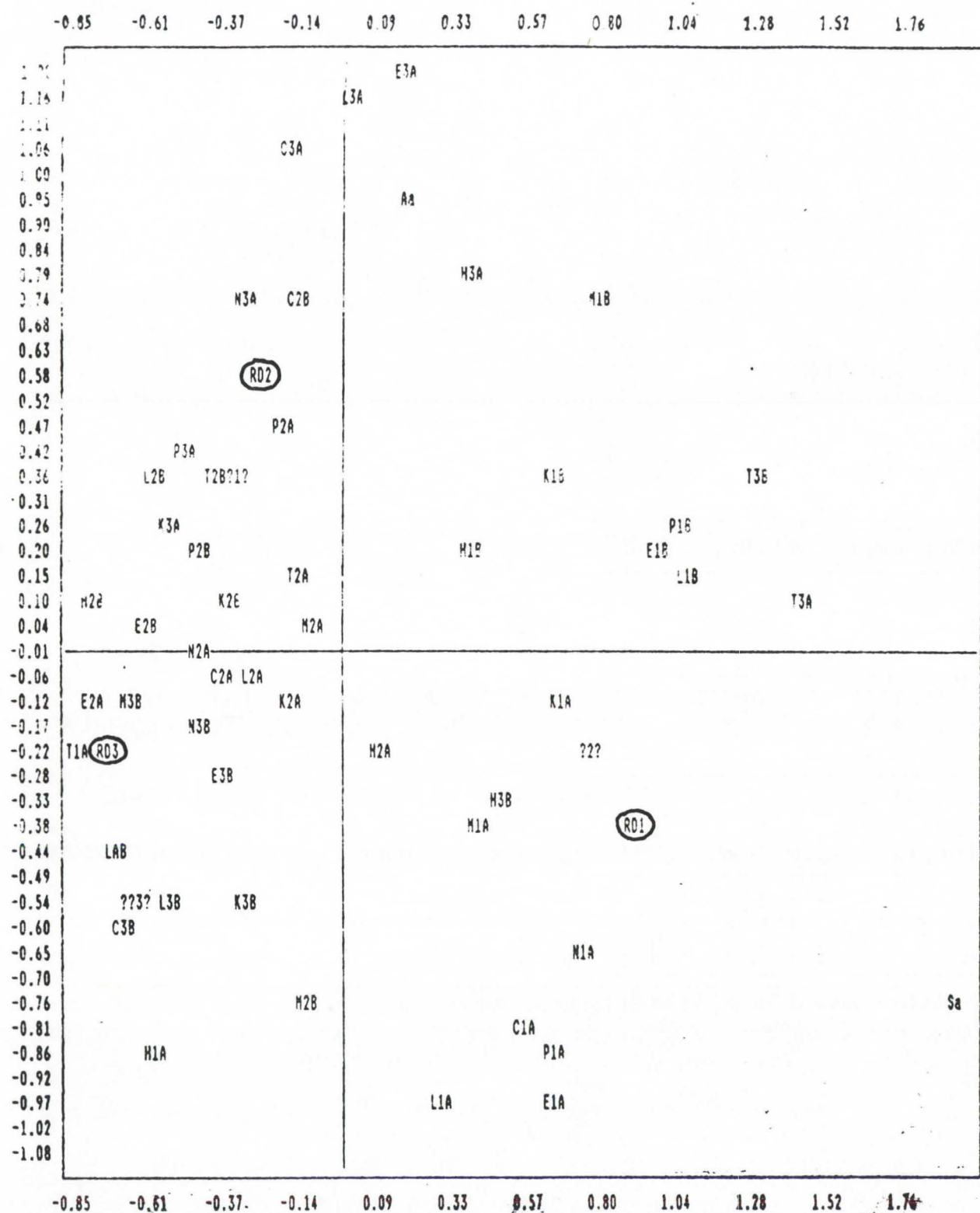
=====

TABLEAU DES EFFECTIFS (suite)

hump2				pota2			phos2			phea2		
T1B T2B T3B				K1B K2B K3B			P1B P2B P3B			H1B H2B H3B		
hump2				pota2			phos2			phea2		
T1B				8								
T2B				0 6								
T3B				0 0 6								
K1B				2 1 4			7					
K2B				3 3 1			0 7					
K3B				3 2 1			0 0 6					
P1B				0 1 6			4 1 2			7		
P2B				3 4 0			2 4 1			0 7		
P3B				5 1 0			1 2 3			0 0 6		
H1B				2 2 3			4 2 1			7		
H2B				4 2 1			1 3 3			0 7		
H3B				2 2 2			2 2 2			0 0 6		
T1B T2B T3B				K1B K2B K3B			P1B P2B P3B			H1B H2B H3B		
hump2				pota2			phos2			phea2		

A.F.C multiple, graphe des deux axes principaux

PROJECTION DES MODALITES DES VARIABLES



POINTS CACHES

POINTS VUS	POINTS CACHES	ABSCISSE	ORDONNEE
?1	M3A	-.3378914	.3497452
?1	M2B	-.3564957	.3652099
?2	M1B	.7627038	-.2421355
?2	C1B	.7627038	-.2421355
?3	P3B	-.6805739	-.5367255
?3	T1B	-.6576493	-.5374947

VALEURS PROPRES ET VECTEURS PROPRES

INERTIE TOTALE 1.999998

1ere COLONNE : VALEURS PROPRES (variances sur les axes principaux)
 2eme COLONNE : CONTRIBUTION A L'INERTIE TOTALE
 (pourcentages expliqués par les axes principaux)
 3eme COLONNE : CONTRIBUTION CUMULEE A L'INERTIE TOTALE
 (pourcentages cumulés expliqués par les axes principaux)

VAL PRO & EXP & CUM

0.40 20 20 /
 0.28 14 34 /
 0.20 14 48 /

Analyse multivariable Haricot

Définitions et libellés des classes

VARIABLE	Nb de CLASSES CREES	CLASSES			
		No	Définition	Libellé	Nb.individus
rdt	3	1	rdt de 361 à 906	rd1	10
		2	rdt > 906 à 1126	rd2	9
		3	rdt > 1126 à 1520	rd3	9
azote	3	1	azote de 6.28 à 7.35	az1	10
		2	azote > 7.35 à 7.61	az2	9
		3	azote > 7.61 à 8.93	az3	9
carbo	3	1	carbo de 6.83 à 7.8	cr1	10
		2	carbo > 7.8 à 8.08	cr2	9
		3	carbo > 8.08 à 8.6	cr3	9
potas	3	1	potas de .05 à .16	k1	9
		2	potas > .16 à .2	k2	10
		3	potas > .2 à .39	k3	9
calci	3	1	calci de 2.65 à 3.88	cl1	9
		2	calci > 3.88 à 4.9	cl2	10
		3	calci > 4.9 à 6.94	cl3	9
phosp	3	1	phosp de 189 à 328	p1	10
		2	phosp > 328 à 382	p2	9
		3	phosp > 382 à 649	p3	9
ds	3	1	ds de .53 à .6	ds1	11
		2	ds > .6 à .66	ds2	8
		3	ds > .66 à .71	ds3	9
hv	3	1	hv de .37 à .39	hv1	10
		2	hv > .39 à .41	hv2	12
		3	hv > .41 à .46	hv3	6
nwd	3	1	nwd de 1.31 à 1.5	nw1	10
		2	nwd > 1.5 à 1.58	nw2	9
		3	nwd > 1.58 à 1.9	nw3	9
itin	2	1	labour	lab	14
		2	non labour	nl	14

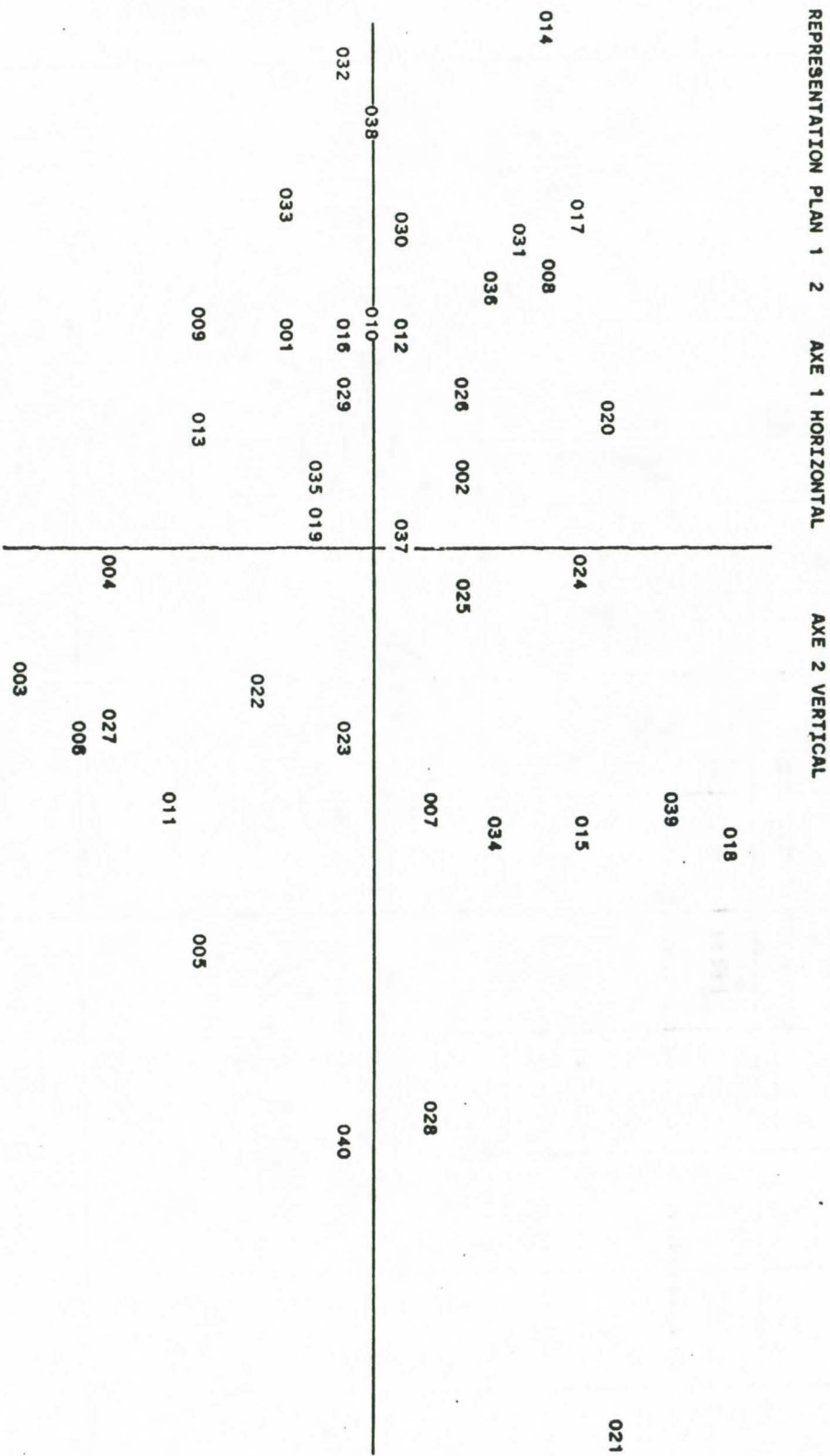
NOMBRE TOTAL DE CLASSES = 29

Tableau de Burt

TABLEAU DES EFFECTIFS

	rdt			azote			carbo			potas			calci			phosp			ds			hv		
	rd1	rd2	rd3	az1	az2	az3	cr1	cr2	cr3	k1	k2	k3	cl1	cl2	cl3	p1	p2	p3	ds1	ds2	ds3	hv1	hv2	hv3
rd1	10																							
rdt rd2	0	9																						
rd3	0	0	9																					
az1	4	2	4	10																				
azote az2	3	4	2	0	9																			
az3	3	3	3	0	0	9																		
cr1	5	2	3	7	2	1	10																	
carbo cr2	3	2	4	2	4	3	0	9																
cr3	2	5	2	1	3	5	0	0	9															
k1	2	3	4	3	4	2	4	2	3	9														
potas k2	5	4	1	3	4	3	3	4	3	0	10													
k3	3	2	4	4	1	4	3	3	3	0	0	9												
cl1	2	4	3	3	4	2	4	4	1	4	2	3	9											
calci cl2	4	2	4	5	1	4	5	1	4	3	5	2	0	10										
cl3	4	3	2	2	4	3	1	4	4	2	3	4	0	0	9									
p1	1	5	4	6	3	1	6	2	2	4	3	3	4	3	3	10								
phosp p2	4	2	3	3	3	3	3	2	4	3	3	3	4	4	1	0	9							
p3	5	2	2	1	3	5	1	5	3	2	4	3	1	3	5	0	0	9						
ds1	4	4	3	4	5	2	3	6	2	3	3	5	7	2	2	3	5	3	11					
ds ds2	4	3	1	2	2	4	3	2	3	0	5	3	0	3	5	2	3	3	0	8				
ds3	2	2	5	4	2	3	4	1	4	6	2	1	2	5	2	5	1	3	0	0	9			
hv1	7	1	2	5	3	2	6	4	0	3	4	3	3	4	3	3	2	5	3	3	4	10		
hv hv2	3	6	3	3	3	6	3	2	7	5	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	5	0	12	
hv3	0	2	4	2	3	1	1	3	2	1	2	3	2	2	2	3	3	0	4	2	0	0	0	6
nv1	4	3	3	5	3	2	6	2	2	5	4	1	5	4	1	5	4	1	3	2	5	5	4	1
nv2	3	3	3	1	4	4	1	3	5	3	3	3	3	2	4	1	4	4	4	3	2	2	4	3
nv3	3	3	3	4	2	3	3	4	2	1	3	5	1	4	4	4	1	4	4	3	2	3	4	2
itin lab	7	5	2	5	7	2	5	6	3	3	7	4	7	4	3	3	7	4	10	4	0	6	4	4
nl	3	4	7	5	2	7	5	3	6	6	3	5	2	6	6	7	2	5	1	4	9	4	8	2
	rd1	rd2	rd3	az1	az2	az3	cr1	cr2	cr3	k1	k2	k3	cl1	cl2	cl3	p1	p2	p3	ds1	ds2	ds3	hv1	hv2	hv3
	rdt			azote			carbo			potas			calci			phosp			ds			hv		
																						nv1	nv2	nv3

Analyse multivariable Labour



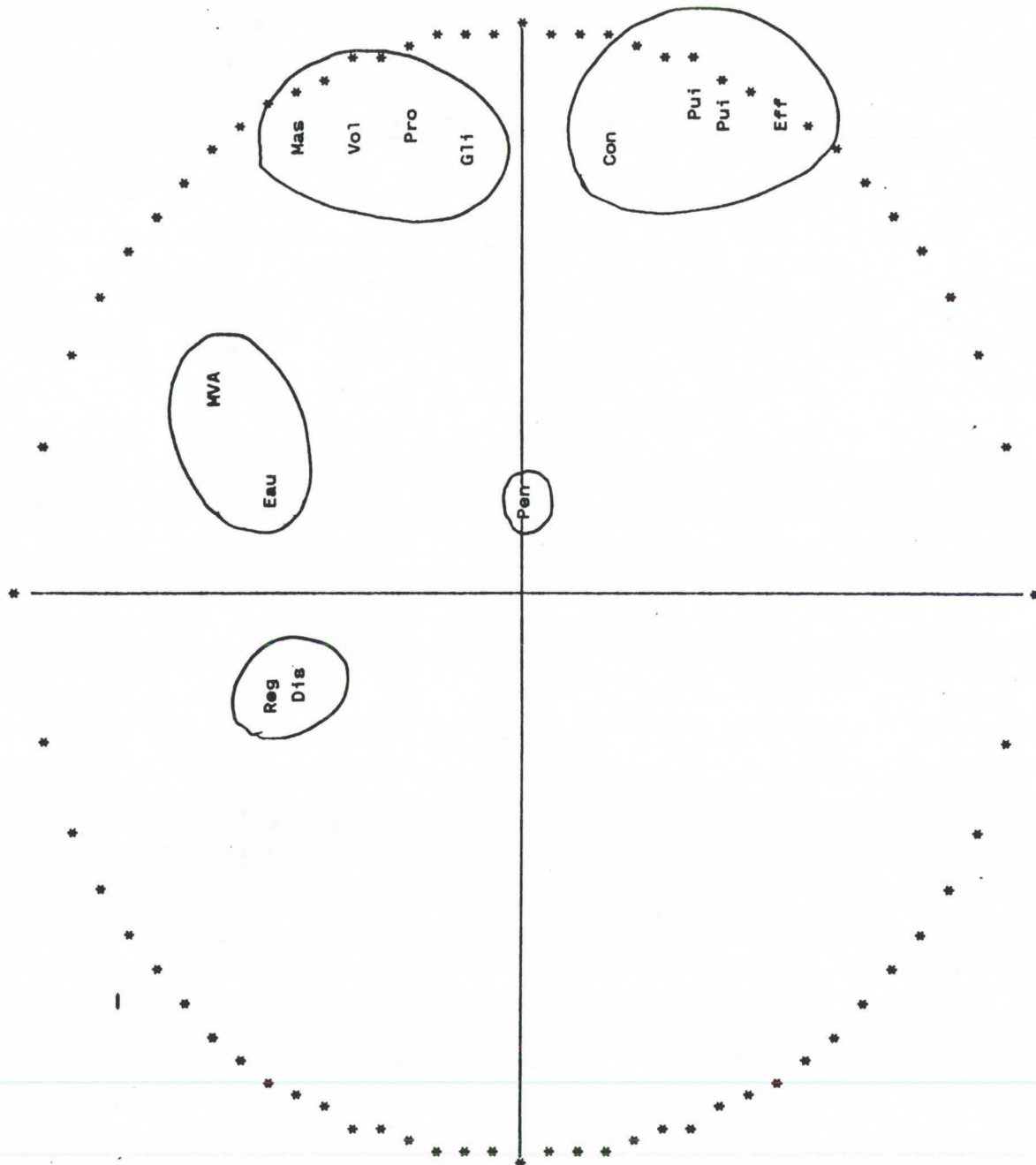
ACP Position des segments sur les deux axes principaux

CERCLE DES CORRELATIONS

PLAN 1 2

AXE 1 HORIZONTAL

AXE 2 VERTICAL



	CREES	No	Définition	Libellé	Nb. individus
Eau	3	1	Eau de .42 à .44	te1	16
		2	Eau > .44 à .48	te2	8
		3	Eau > .48 à .52	te3	16
MVAS	3	1	MVAS de 1.07 à 1.11	mv1	12
		2	MVAS > 1.11 à 1.13	mv2	13
		3	MVAS > 1.13 à 1.26	mv3	15
Prof	3	1	Prof de .18 à .21	pr1	12
		2	Prof > .21 à .23	pr2	16
		3	Prof > .23 à .32	pr3	12
Volum	3	1	Volum de 1.52 à 1.78	v11	14
		2	Volum > 1.78 à 1.95	v12	14
		3	Volum > 1.95 à 2.69	v13	12
Dist	3	1	Dist de 9.01 à 9.55	ds1	13
		2	Dist > 9.55 à 9.95	ds2	14
		3	Dist > 9.95 à 10.28	ds3	13
Masse	3	1	Masse de 1700 à 1996	m1	14
		2	Masse > 1996 à 2188	m2	13
		3	Masse > 2188 à 3283	m3	13
Gliss	3	1	Gliss de 5.17 à 8.07	g11	13
		2	Gliss > 8.07 à 9.89	g12	14
		3	Gliss > 9.89 à 13.52	g13	13
Pente	3	1	Pente de -4.87 à -2.08	p1	14
		2	Pente > -2.08 à -.89	p2	13
		3	Pente > -.89 à 1.71	p3	13
Regim	3	1	Regim de 1970 à 2100	rg1	13
		2	Regim > 2100 à 2150	rg2	12
		3	Regim > 2150 à 2180	rg3	15
Conso	3	1	Conso de 10.2 à 12	co1	16
		2	Conso > 12 à 13.2	co2	10
		3	Conso > 13.2 à 15.6	co3	14
Pui.r	3	1	Pui.r de 26.35 à 33.32	pu1	14
		2	Pui.r > 33.32 à 37.43	pu2	12
		3	Pui.r > 37.43 à 45.87	pu3	14
Pui.b	3	1	Pui.b de 18.74 à 23.54	pb1	14
		2	Pui.b > 23.54 à 29.11	pb2	13
		3	Pui.b > 29.11 à 34.13	pb3	13
Eff.b	3	1	Eff.b de 11.3 à 14.5	ef1	14
		2	Eff.b > 14.5 à 17.93	ef2	13
		3	Eff.b > 17.93 à 20.98	ef3	13

Transformation
de variables
en classes

Définition et libellé

Tableau de Burt

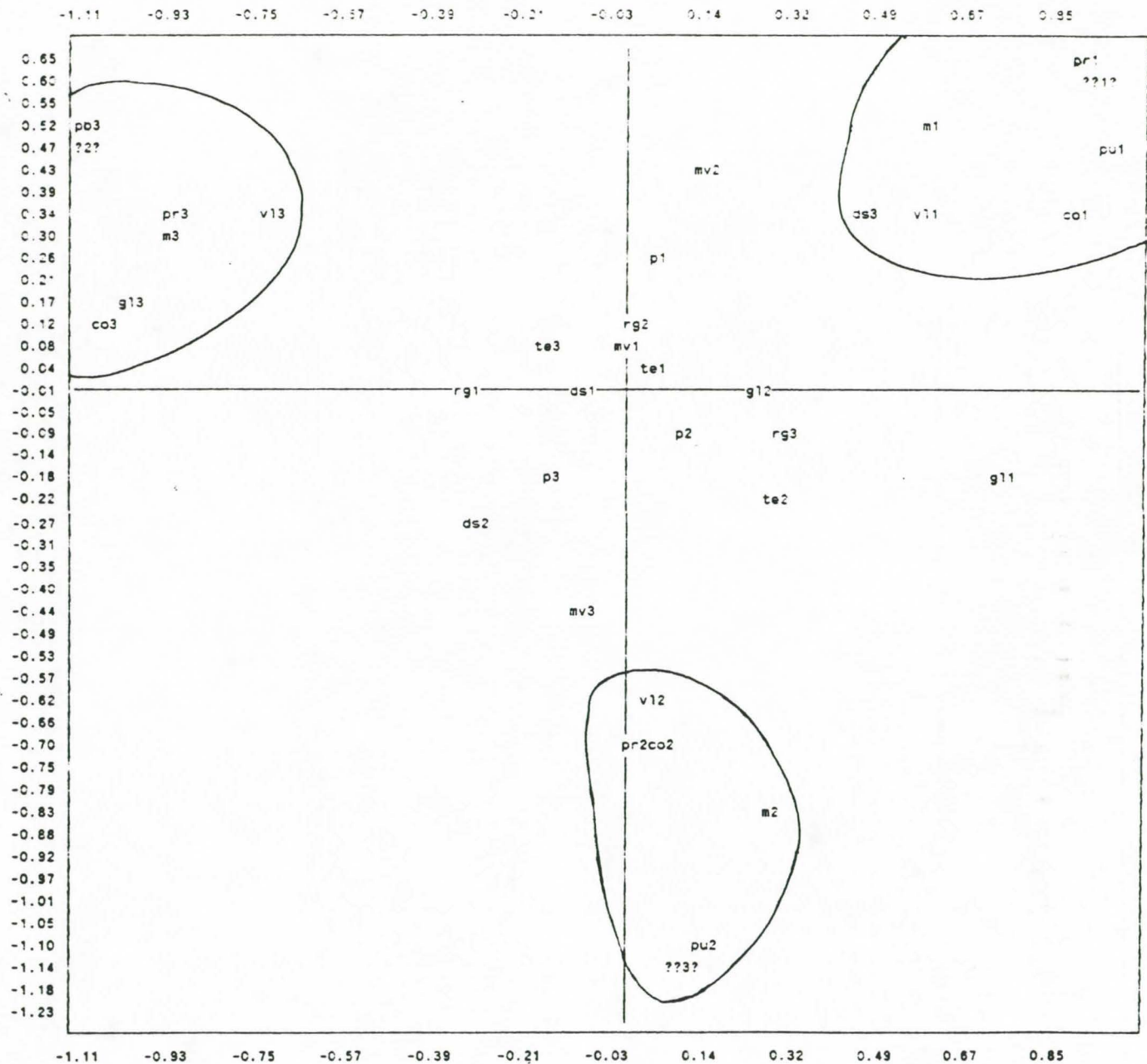
[illegible]

AFC multiple

GRAPHES 1 2

AXE HORIZONTAL : 1 AXE VERTICAL : 2

PROJECTION DES MODALITES DES VARIABLES



POINTS CACHES

POINTS VUS	POINTS CACHES	ABSCISSE	ORDONNEE
1	pb1	.9351027	.5974341
1	ef1	.9519417	.6235166
2	pu3	-1.105039	.469686
2	ef3	-1.118878	.4541571
3	ef2	9.770572E-02	-1.125696
3	pb2	.1084599	-1.161195

VALEURS PROPRES ET VECTEURS PROPRES

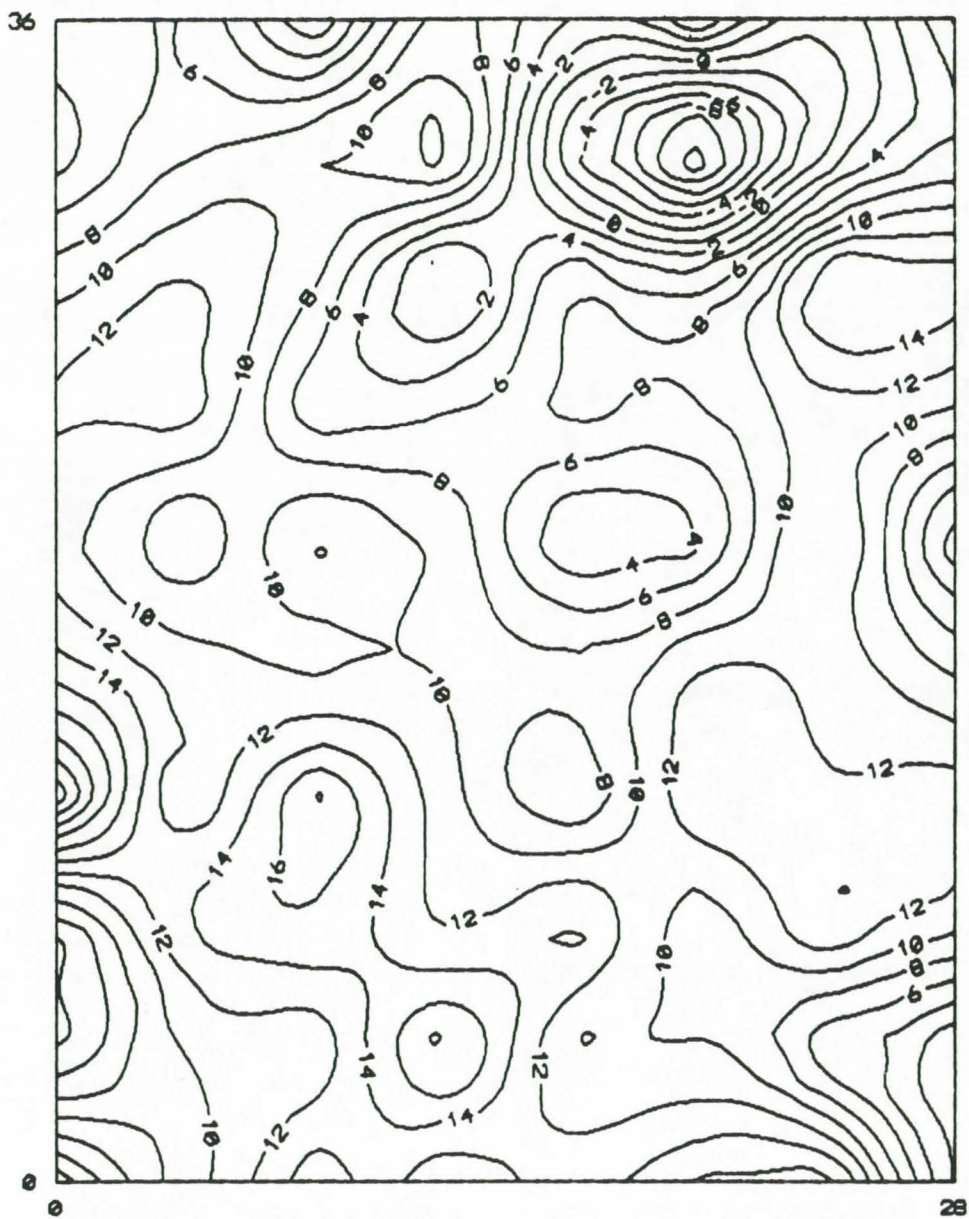
INERTIE TOTALE 2.000001

1ere COLONNE : VALEURS PROPRES (variances sur les axes principaux)
 2eme COLONNE : CONTRIBUTION A L'INERTIE TOTALE
 (pourcentages expliqués par les axes principaux)
 3eme COLONNE : CONTRIBUTION CUMULEE A L'INERTIE TOTALE
 (pourcentages cumulés expliqués par les axes principaux)

VAL.PRO %EXP %CUM

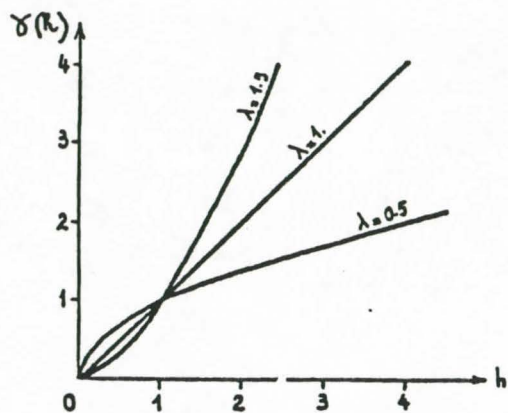
0.38 19 19 / *****
 0.24 12 31 / *****
 0.22 11 42 / *****

**Variation de teneur en eau volumique
entre mars 90 et août 89 à 10-15 cm**

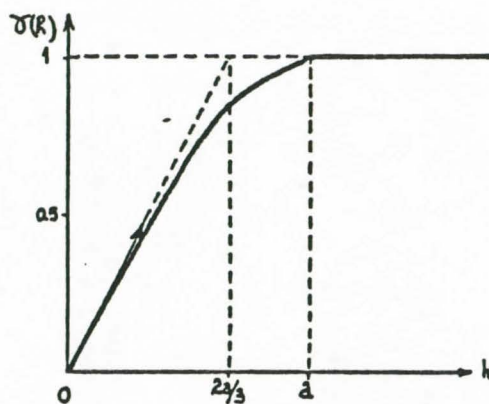


PRINCIPAUX MODELES DE VARIOGRAMMES

D'après DELHOMME (1976)



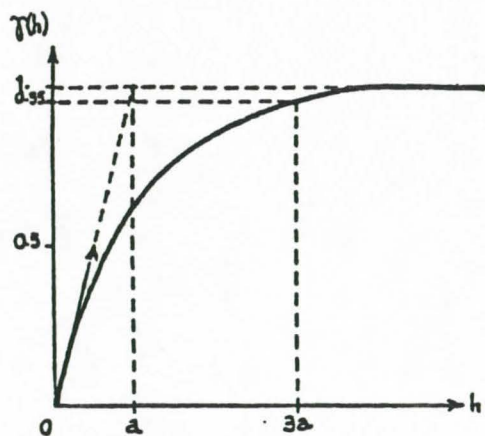
modèle en h^λ : $\gamma(h) = \omega |h|^\lambda$



modèle sphérique:

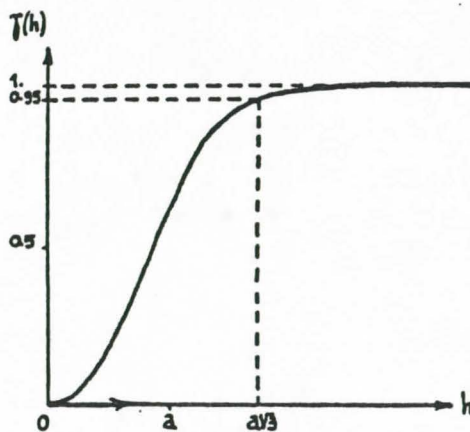
$$\gamma(h) = \omega \left[\frac{3}{2} \frac{|h|}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{|h|}{a} \right)^3 \right] \quad h \leq a$$

$$\gamma(h) = \omega \quad h > a$$



modèle exponentiel:

$$\gamma(h) = \omega \left[1 - e^{-\frac{|h|}{a}} \right]$$



modèle gaussien:

$$\gamma(h) = \omega \left[1 - e^{-\left(\frac{|h|}{a} \right)^2} \right]$$

3

D'après GASCUEL-ODOUX (1984)

1) Rappel des hypothèses

L'estimation est . linéaire soit :
$$z_0^* = \sum_i \lambda_i z_i \quad (1)$$

. non biaisée soit : $E(Z_o^*) = E(Z_o) = E(\sum \lambda_i z_i)$
d'où $\sum \lambda_i = 1$ (2)

. optimale soit : $\text{VAR}\{Z_o^* - Z_o\}$ minimal
d'où $E\{(Z_o^* - Z_o)^2\}$ minimal
dans l'hypothèse intrinsèque (3)

2) Développement des équations en fonction du variogramme

Développons (3)

$$\begin{aligned} E\{(Z_0^* - Z_0)^2\} &= E\{(\sum_i \lambda_i^0 (z_i - z_0))^2\} \\ &= E\{\sum_i \lambda_i^0 (z_i - z_0) \cdot \sum_j \lambda_j^0 (z_j - z_0)\} \\ &= \sum_i \sum_j \lambda_i^0 \lambda_j^0 E\{(z_i - z_0)(z_j - z_0)\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{or } \gamma(x_i - x_j) &= \frac{1}{2} E\{(z_i - z_j)^2\} \\ &= \frac{1}{2} E\{((z_i - z_o) - (z_j - z_o))^2\} \\ &= \frac{1}{2} E\{(z_i - z_o)^2\} + \frac{1}{2} E\{(z_j - z_o)^2\} - E\{(z_i - z_o)(z_j - z_o)\} \end{aligned} \quad (5)$$

L'expression (3) devient, en tenant compte de (4) et (5) :

$$E\{(Z_o^* - Z_o)^2\} = \sum_i \sum_j \lambda_i^0 \lambda_j^0 \{\gamma(x_i - x_o) + \gamma(x_j - x_o) - \gamma(x_i - x_j)\}$$

D'après (1), on a donc :

$$E\{(Z_o^* - Z_o)^2\} = - \sum_i \sum_j \lambda_i^0 \lambda_j^0 \gamma(x_i - x_j) + 2 \sum_i \lambda_i^0 \gamma(x_i - x_o) \quad (6)$$

Cette condition d'optimalité s'exprime donc en fonction du variogramme.

3) Résolution du problème

Pour minimiser l'expression (6), en tenant compte de (1), on utilise le multiplicateur de Lagrange μ qui permet de minimiser l'expression (7) :

$$\frac{1}{2} E\{(Z_o^* - Z_o)^2\} - \mu \{\sum_i \lambda_i^0 - 1\} \quad (7)$$

Le problème est résolu en annulant les dérivées partielles par rapport aux λ_i^0 et à μ , on obtient alors le système de krigeage suivant, résolu de façon matricielle :

$$\sum_j \lambda_j^0 \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_i - x_o)$$

$$\sum_i \lambda_i^0 = 1$$

Les λ_i^0 et μ étant alors connus, l'estimation et la variance d'estimation sont calculées à partir des expressions :

$$Z_o^* = \sum_i \lambda_i^0 z_i$$

$$\begin{aligned} \text{VAR}\{Z_o^* - Z_o\} &= E\{(Z_o^* - Z_o)^2\} \\ &= \sum_i \lambda_i^0 \gamma(x_i - x_o) + \mu \end{aligned}$$

Résumé

Ce travail concerne les horizons superficiels de sols andiques de la Réunion et consiste à en décrire les propriétés physiques et leur évolution sous contraintes, à définir des composantes de leur aptitude culturale par la mise en relation de ces propriétés avec les dynamiques superficielles de l'eau et des structures, les conditions de mise en culture et le comportement des plantes.

On montre que le regroupement des sols à caractères andiques correspond à une réalité fonctionnelle. Ces sols se caractérisent par une forte réactivité vis-à-vis des contraintes hydriques, réactivité évolutive selon un gradient climatique, altitudinal et minéralogique. L'étude des particules élémentaires stables et de leur évolution souligne l'importance déterminante de la matrice fine très hydratée constituée d'halloysite et d'allophanes /-s sur l'ensemble des propriétés physiques, hydriques et mécaniques. Les seuils énergétiques de réversibilité de ces propriétés sont définis pour deux matériaux-types. En outre, la faible réactivité vis-à-vis des contraintes mécaniques est montrée.

Sur andosols, les horizons profonds soumis à des contraintes hydriques poussées présentent des caractéristiques proches de celles des horizons affleurants. En place, ces deux types d'horizons sont nettement différenciés : au plan de la dynamique des structures et de l'eau, dont les déterminismes sont fortement influencés par les conditions de mise en culture, au plan de l'ensemble des indicateurs physiques et chimiques de la fertilité.

Sous pluies simulées, les processus générateurs de ruissellement et d'érosion sont décrits. Les résultats soulignent le comportement particulier des andosols : infiltrabilité gouvernée par l'horizon continu sous-jacent, transport de structures grossières, battance et ruissellement diffus modérés sur sol non dégradé, plus marqués sur sol dégradé.

Une méthodologie d'étude des relations sol - plante - opérations culturales est expérimentée, prenant en compte la variabilité spatiale du milieu.

On montre la concordance de statut entre éléments nutritifs essentiels, selon le type d'horizon affleurant, selon la profondeur de mesure. On souligne l'intérêt prédictif de l'analyse de sol pour la culture de maïs dont les rendements s'expriment clairement en fonction de critères chimiques superficiels ou profonds, alors que les rendements en haricot dépendent plus de la part de fertilité anthropique (intrants).

Concernant les interactions sol - matériel de préparation de sol, on décrit les effets de différents types de matériel sur la répartition des phases, les systèmes de porosité, la circulation de l'eau, l'évolution de la chimie du sol. On montre que le labour est un facteur d'émiettement des structures et d'homogénéisation des caractéristiques du sol. Les performances du couple tracteur - charrue sont étudiées en relation avec des propriétés du sol. On montre que le glissement dépend à la fois de l'état du sol au moment du travail et de la profondeur de labour, que le travail des andosols nécessite une puissance importante, essentiellement à cause de la résistance que le matériau oppose au passage de l'outil.

Mots-clés : Sols andiques - Andosols - Propriétés physiques - Espace poral - Etat structural - Dynamique de l'eau - Ruissellement - Travail du sol - Performances des matériels - Rendement

Key-Words : - Andisols - Physical properties - Porosity - Structure - Water flow - Run-off - Tillage - Implements performances - yield